

# EXOPLANÈTES

## 1000 nouveaux mondes...

Aurélien CRIDA

24 juin 2014



Observatoire  
de la CÔTE d'AZUR

# EXO-PLANETES : QUOI ? POURQUOI ?

Planète = gros corps céleste inerte qui orbite autour du Soleil.  
Il y en a 8: Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune.

Exo-planète = planète extra-solaire = planète qui orbite autour d'une autre étoile que le Soleil.

Il y a des milliards d'étoiles dans notre Voie Lactée...

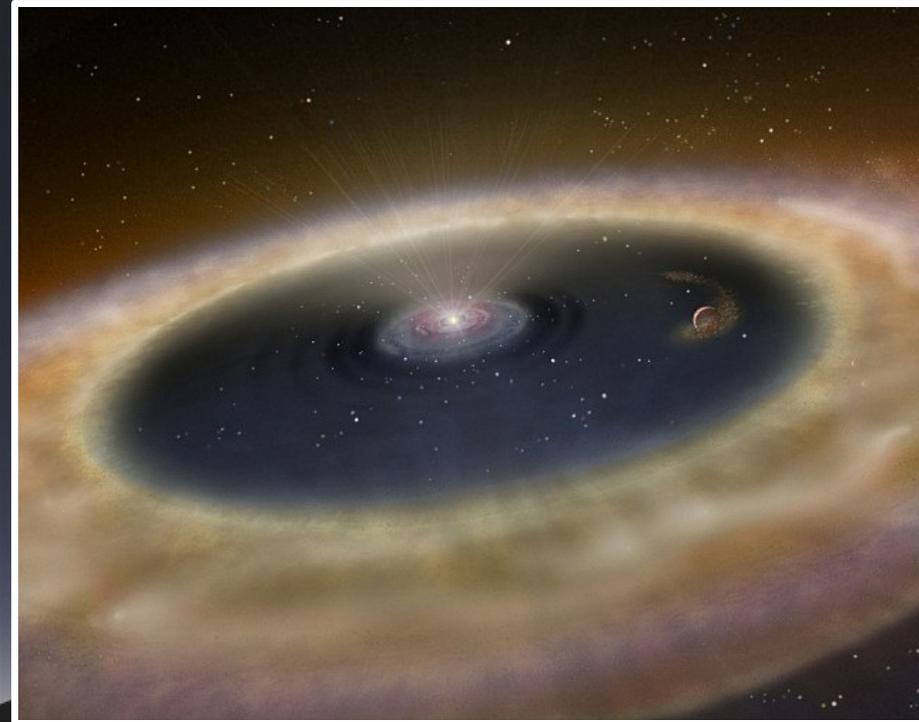
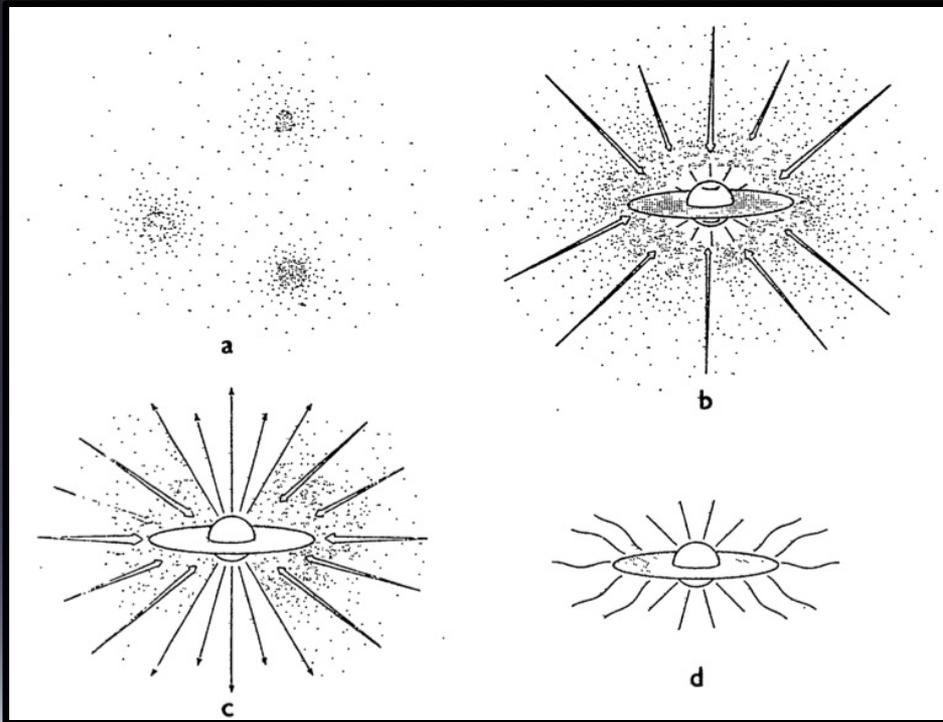


# EXO-PLANETES : QUOI ? POURQUOI ?

**Formation d'étoile → disque proto-planétaire → planètes.**

(cf travaux dans l'équipe planéto).

Il devrait donc y avoir plein de planètes partout !



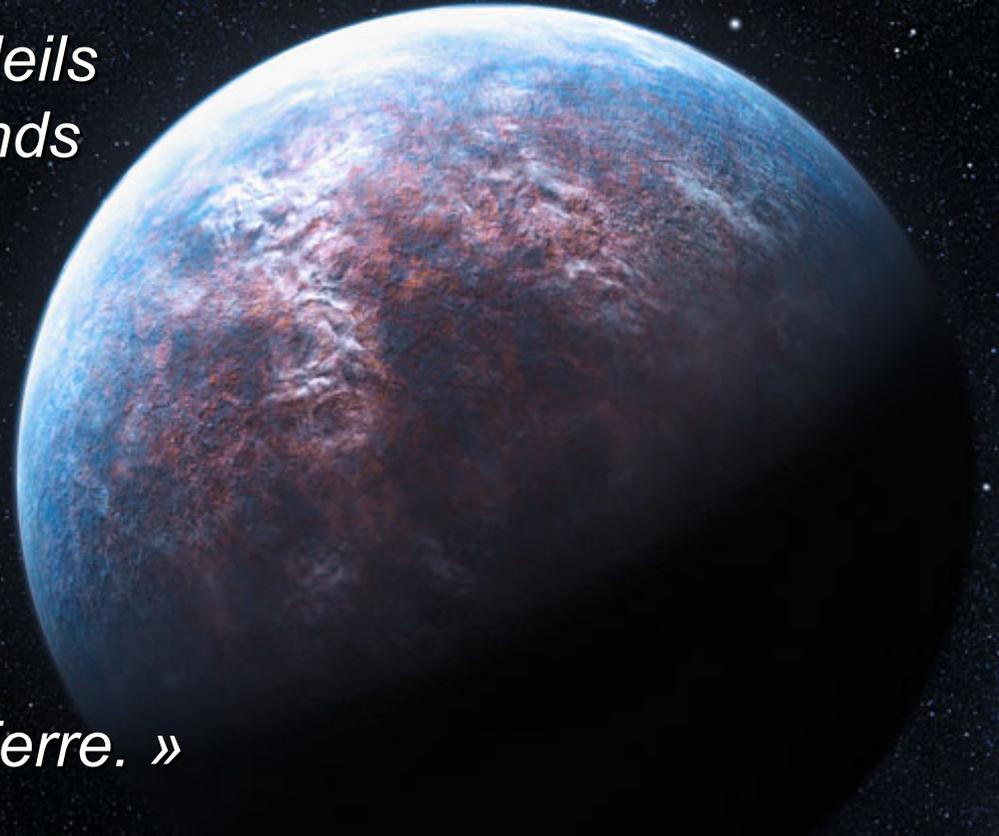
Pourtant, j'ai appris à l'école primaire (fin des années 1980) qu'il y avait 8 (9) planètes dans le système solaire, et c'est tout.

*« Il y a d'innombrables soleils et d'innombrables terres, toutes tournant autour de leur soleil comme le font les sept planètes de notre système. »*

*Nous n'en voyons que les soleils parce qu'ils sont les plus grands et les plus lumineux, mais leurs planètes nous restent invisibles parce qu'elles sont petites et peu lumineuses.*

*Les innombrables mondes de l'univers ne sont pas pires et moins habités que notre Terre. »*

*Giordano Bruno, de l'infinito universo e mondi (1574)*



Les étoiles sont un milliard de fois plus brillantes que les planètes.



Les étoiles sont un milliard de fois plus brillantes que les planètes.  
Comme un ver luisant à côté d'un phare...



Les étoiles sont un milliard de fois plus brillantes que les planètes.  
Comme un ver luisant à côté d'un phare...

Et très loin !

Comme un ver luisant à côté d'un phare à New York.



# VOIR des EXO-PLANETES

Parfois, ça marche !

On observe directement la planète autour de son étoile, si celle-ci est très peu brillante (naine brune).

Première image d'une  
exoplanète :  
Chauvin et al. (2004)

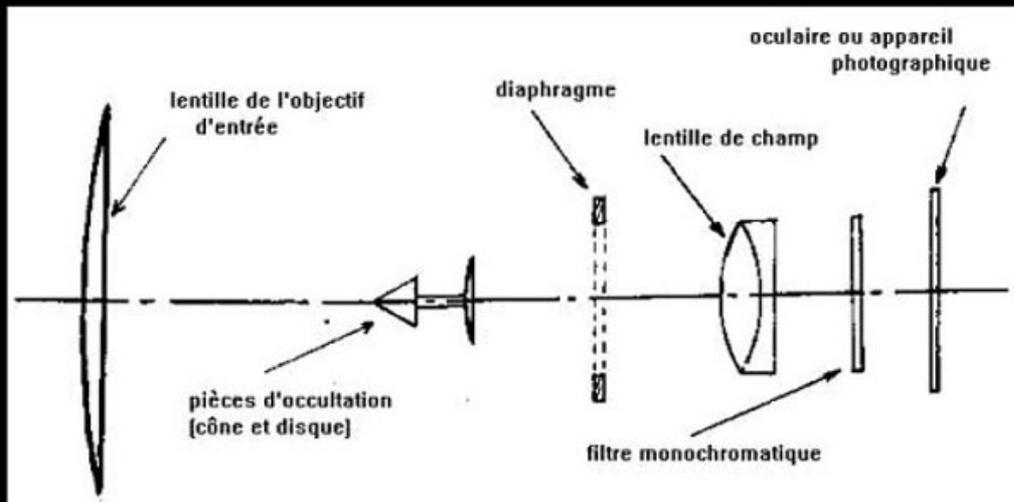
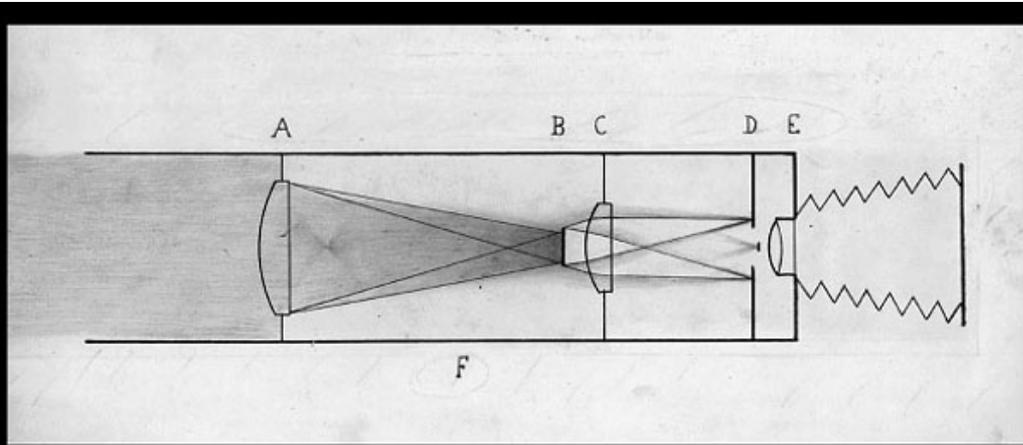


Plutôt une naine brune double...



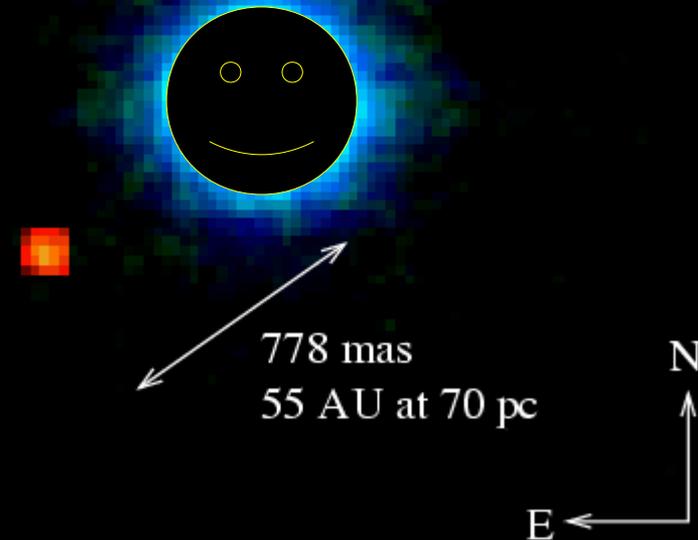
# VOIR des EXO-PLANETES

Si besoin, on cache l'étoile avec un **coronographe**.

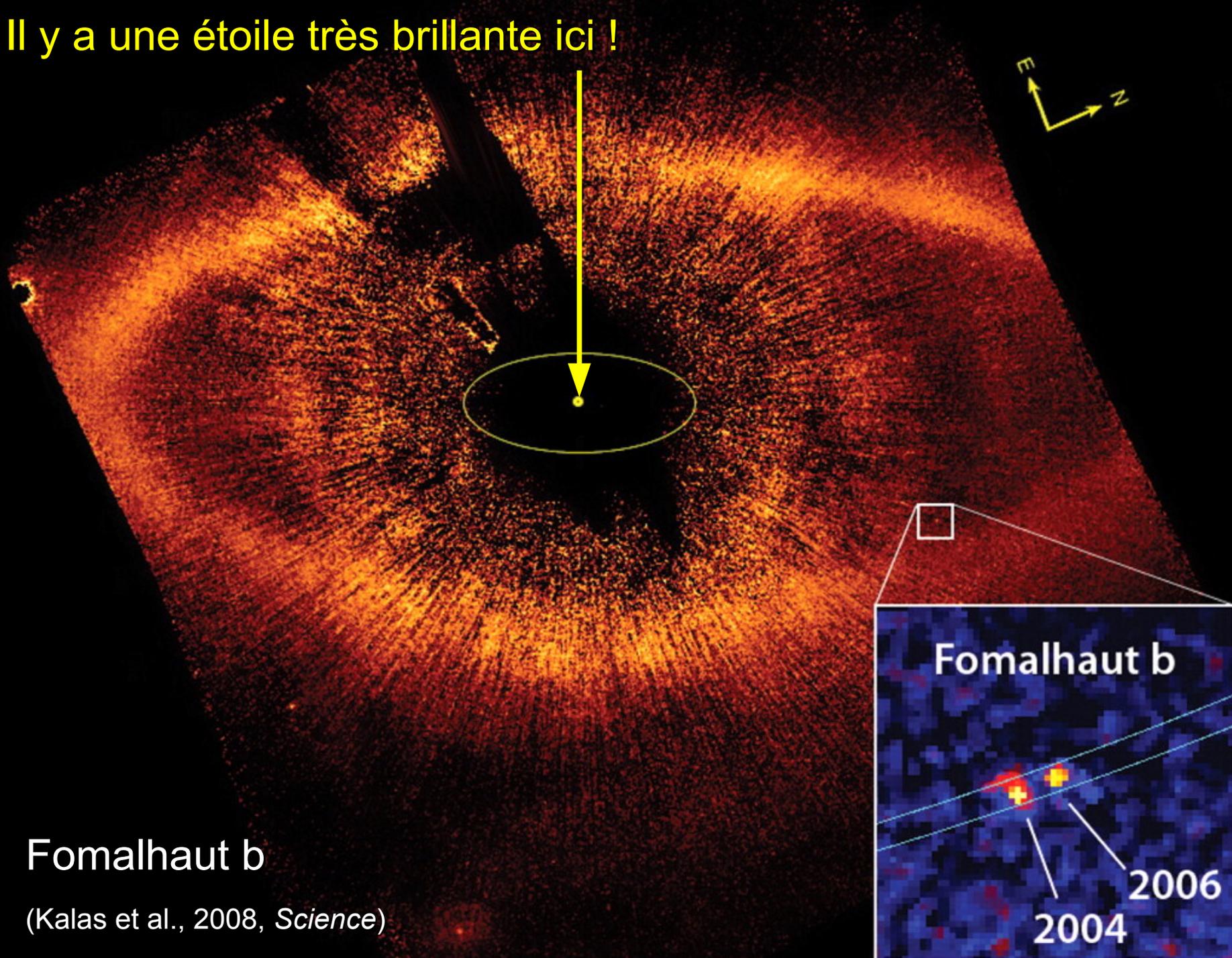


Schemas du principe de fonctionnement d'un coronographe.  
celui du dessus a ete dessine par Bernard Lyot ...

MASSWJ1207334-393254



Il y a une étoile très brillante ici !



Fomalhaut b

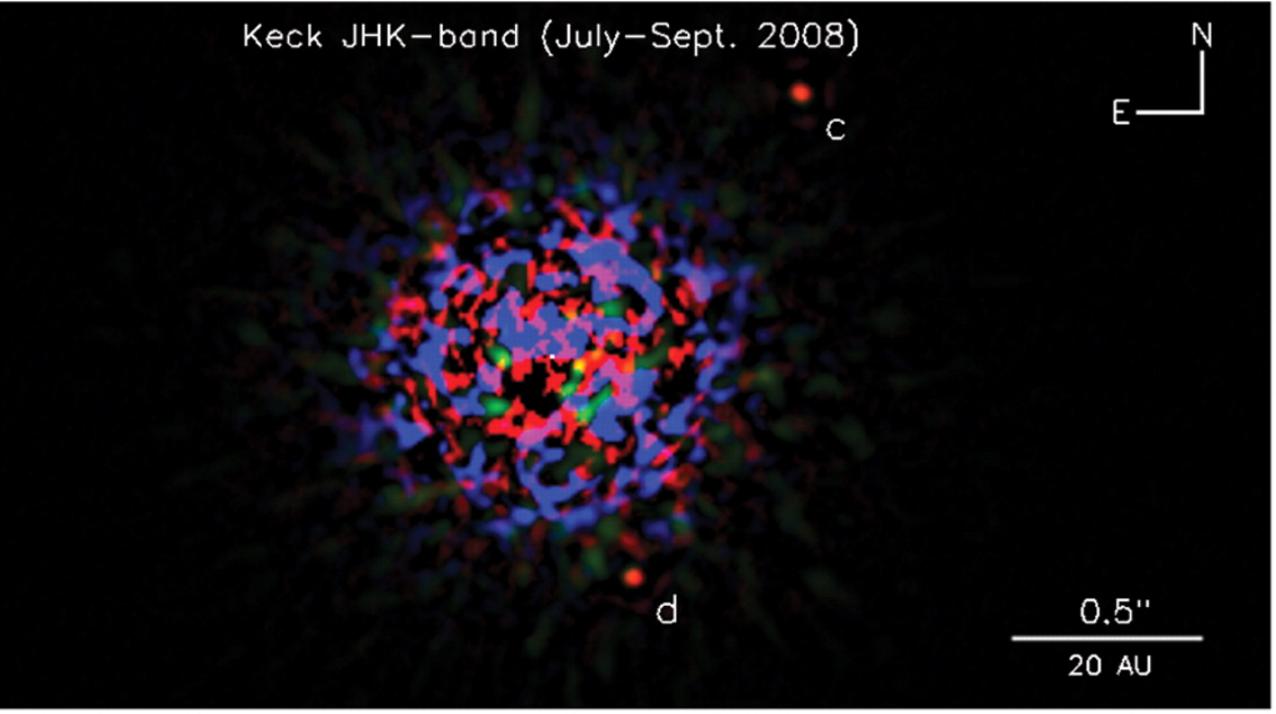
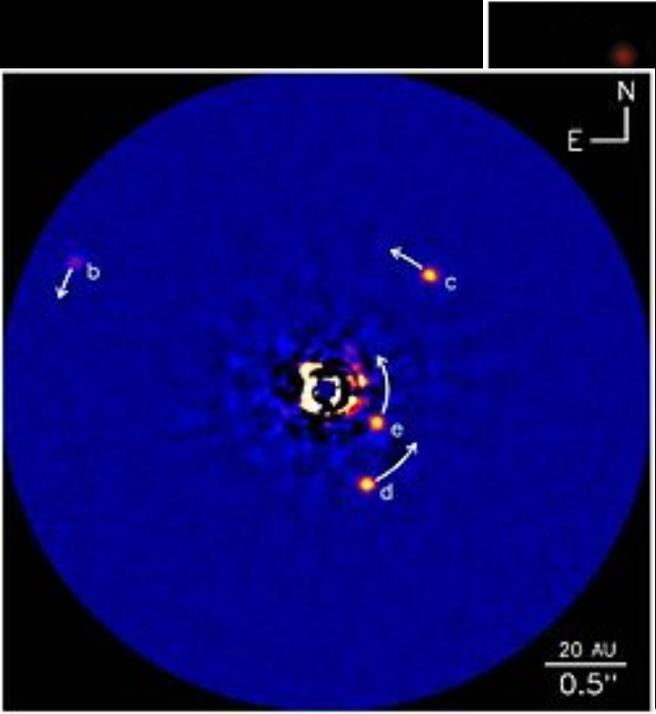
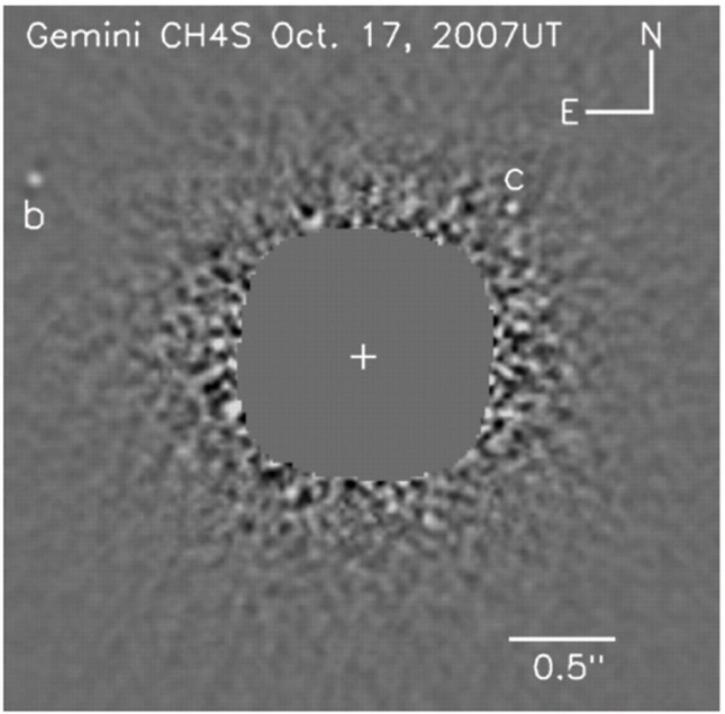
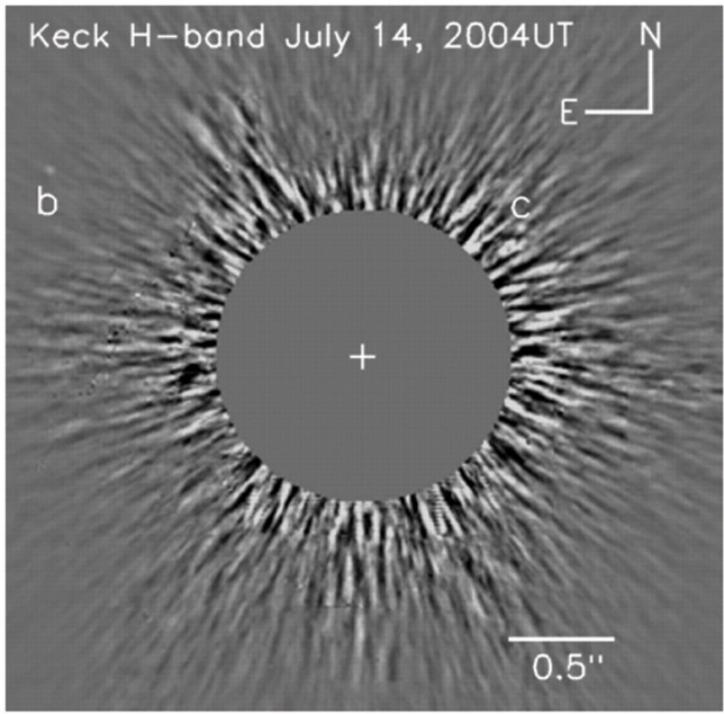
(Kalas et al., 2008, *Science*)

# HR8799 :

3 planètes géantes à 24, 38, et 68 UA de l'étoile.

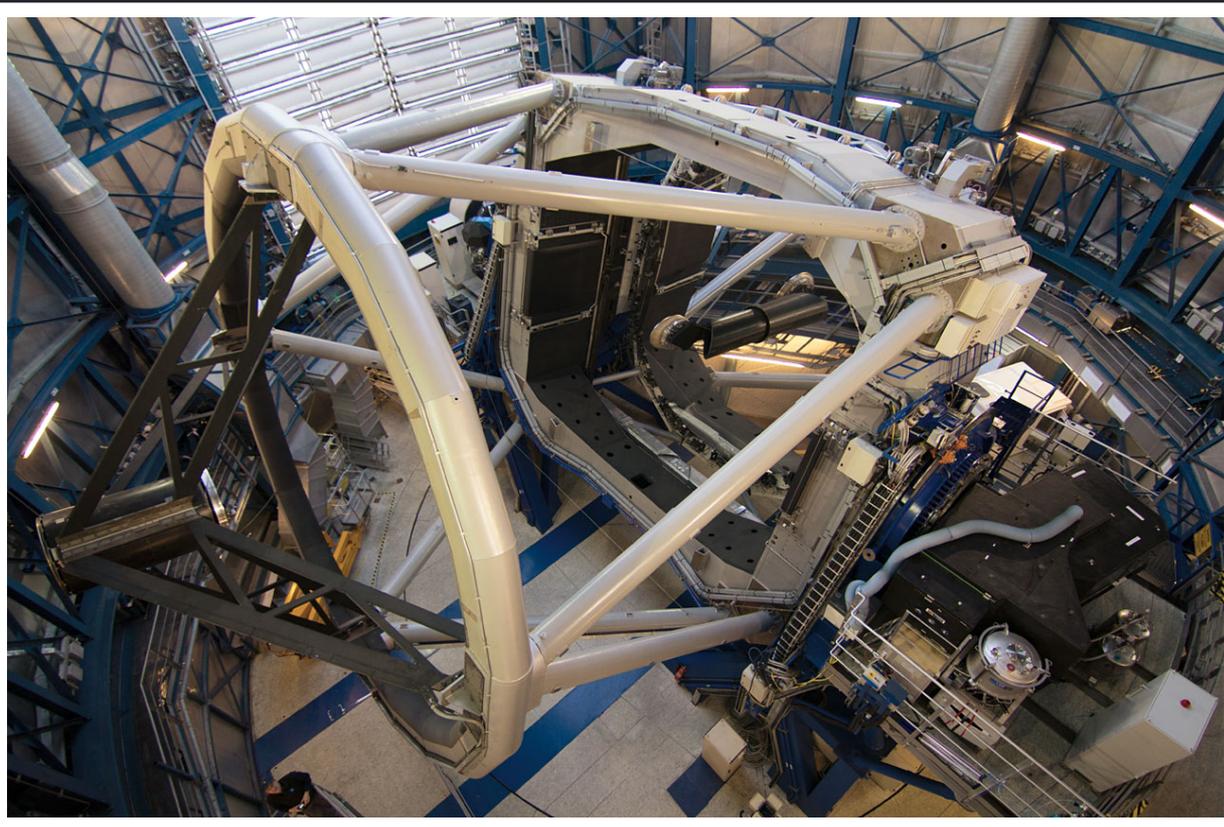
(Marois et al., 2008)

+ 1 quatrième confirmée fin novembre 2010



# VOIR des EXO-PLANETES : SPHERE

SPectropolarimetric High-contrast Exoplanet REsearch:  
Un nouvel instrument au VLT  
pour voir le voisinage très proche des étoiles.



# VOIR des EXO-PLANETES : SPHERE

SPectropolarimetric High-contrast Exoplanet REsearch:

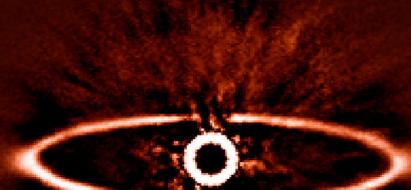
Un nouvel instrument au VLT

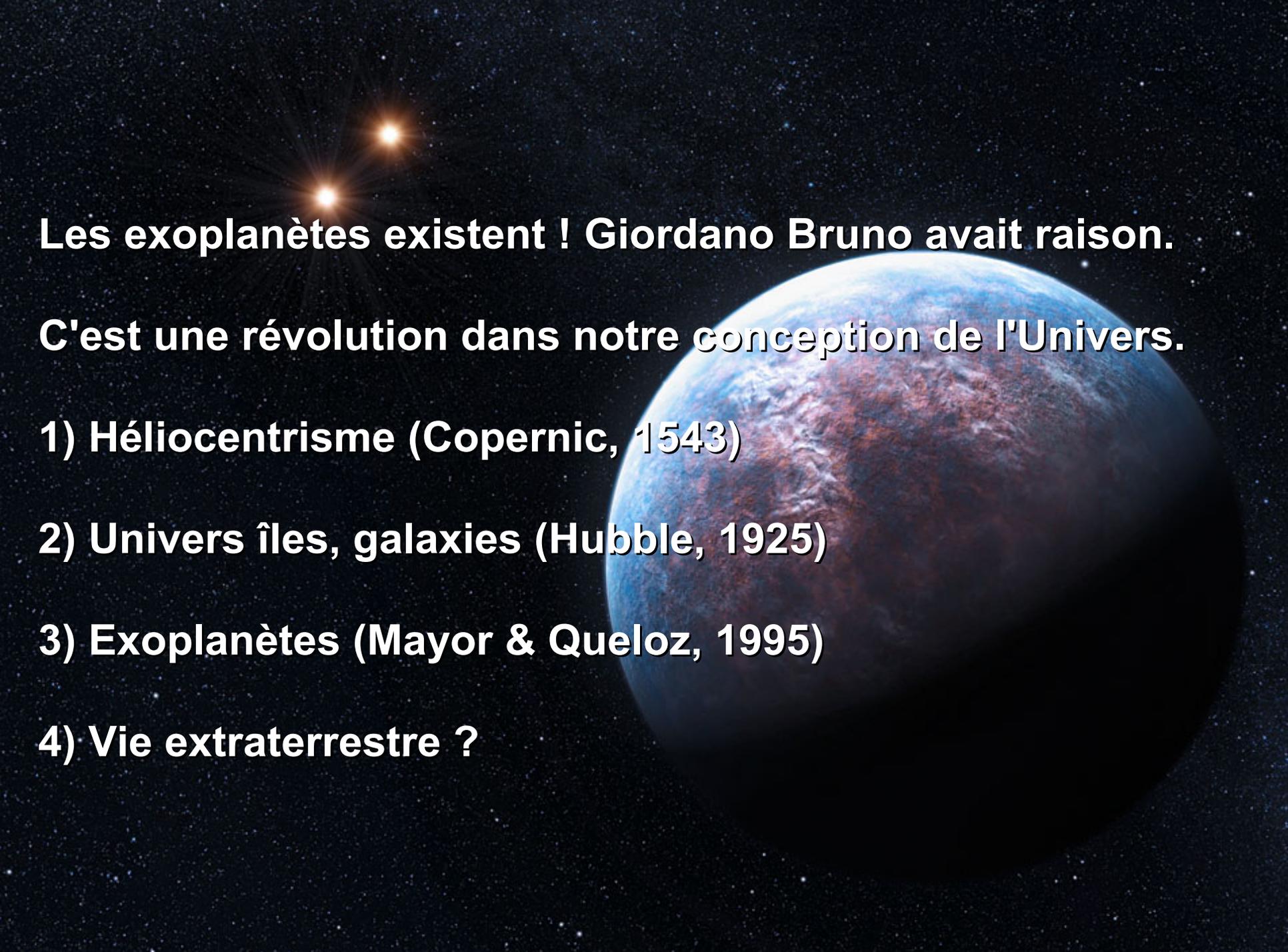
pour voir le voisinage très proche des étoiles.

Laboratoire pilote: IPAG (Grenoble).

Implication de LAGRANGE: Éric Lagadec, Patrice Martinez,  
Thierry Lanz, Zeinab Khorrami, Farrokh Vakili, Andrea Ferrari,  
Lyu Abe, Marcel Carbillet, Djamel Mekarnia...

Premiers tests très  
satisfaisants :





**Les exoplanètes existent ! Giordano Bruno avait raison.**

**C'est une révolution dans notre conception de l'Univers.**

**1) Héliocentrisme (Copernic, 1543)**

**2) Univers îles, galaxies (Hubble, 1925)**

**3) Exoplanètes (Mayor & Queloz, 1995)**

**4) Vie extraterrestre ?**

# FORMULE de DRAKE

## Formule de Drake (1971)

ou comment fractionner notre ignorance à propos du nombre  $N$  de civilisations, ayant développé une technologie électromagnétique, actuellement présentes dans notre Galaxie:

$$N = R \times f \times L$$

$R$  = rythme annuel moyen de formation d'étoiles de type solaire dans la Galaxie (de l'ordre de 1 par an)

$f$  = fraction des étoiles de type solaire de la Galaxie abritant un système planétaire, abritant une vie intelligente, ayant développé des moyens de télécommunications électromagnétiques

$L$  = durée durant laquelle ces civilisations restent détectables ( $L > 100$  ans, à en juger par l'Humanité)

# FORMULE de DRAKE

La formule de Drake, c'est un peu multiplier l'infini par zéro...

$f$  = fraction des étoiles de type solaire de la Galaxie abritant un système planétaire, abritant une vie intelligente ayant développé des moyens de télécommunications électromagnétiques.

$$f = f_{\text{planètes}} * n_{\text{habitables}} * f_{\text{vie}} * f_{\text{intel}} * f_{\text{com}}$$

$R, f_p, n_{\text{hab}}$  = facteurs astronomiques, mieux connus.

$f_{\text{vie}}, f_{\text{intel}}$  = facteurs biologiques.

$f_{\text{com}}, L$  = facteurs sociologiques...

# Introduction

- Existence, Observation directe
- Équation de Drake

## I Méthodes de détection indirectes

- Vitesse radiale (vélocimétrie)
- Transit (photométrie)

## II Propriétés, Habitabilité

- Classes d'exoplanètes
- Conditions d'habitabilité, zone habitable.

## Conclusion : le paradoxe de Fermi

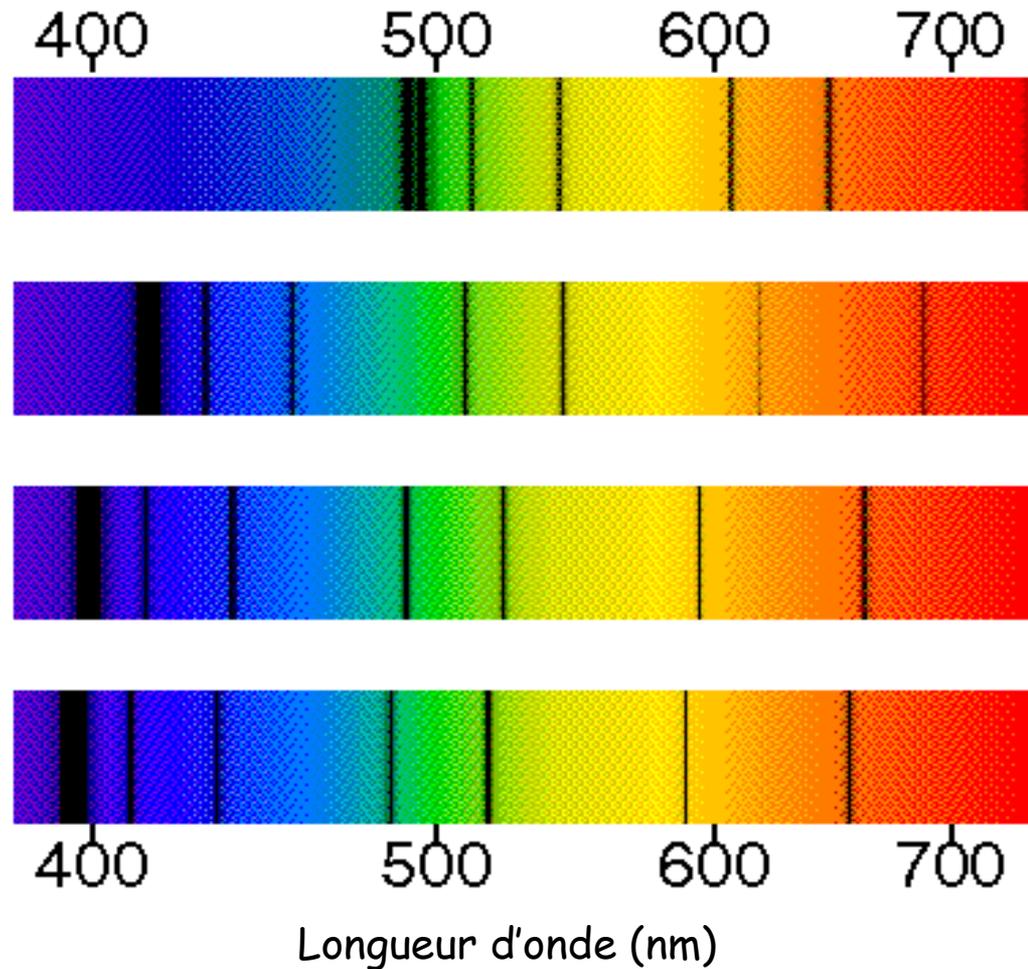


# EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

Effet Doppler :

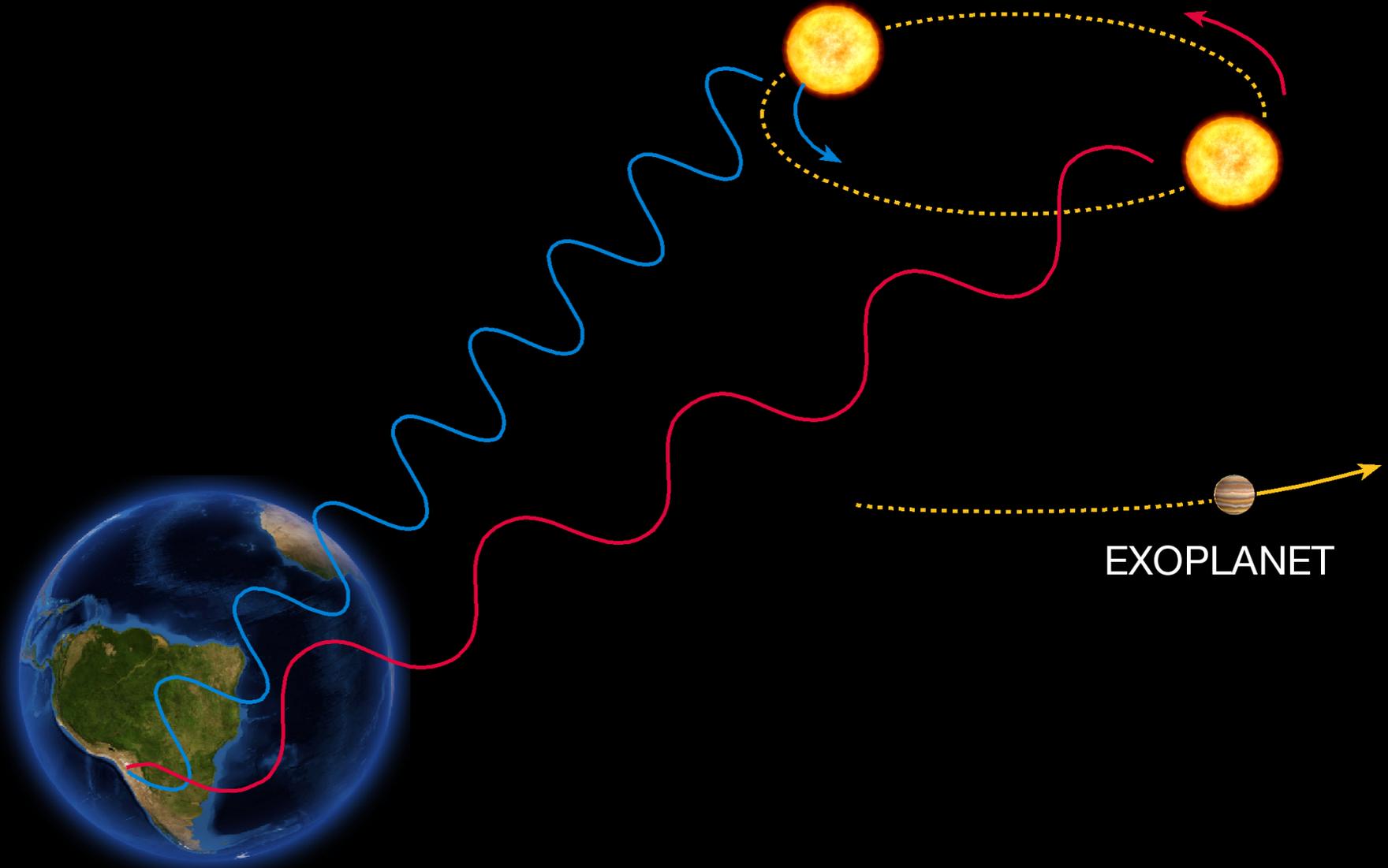
Quand un objet s'éloigne de nous, la longueur d'onde du rayonnement qu'il émet augmente → décalage vers le rouge.

Quand un objet s'approche, décalage vers le bleu.



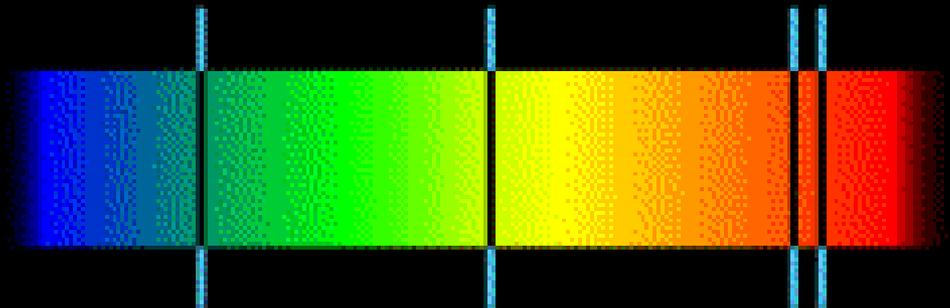
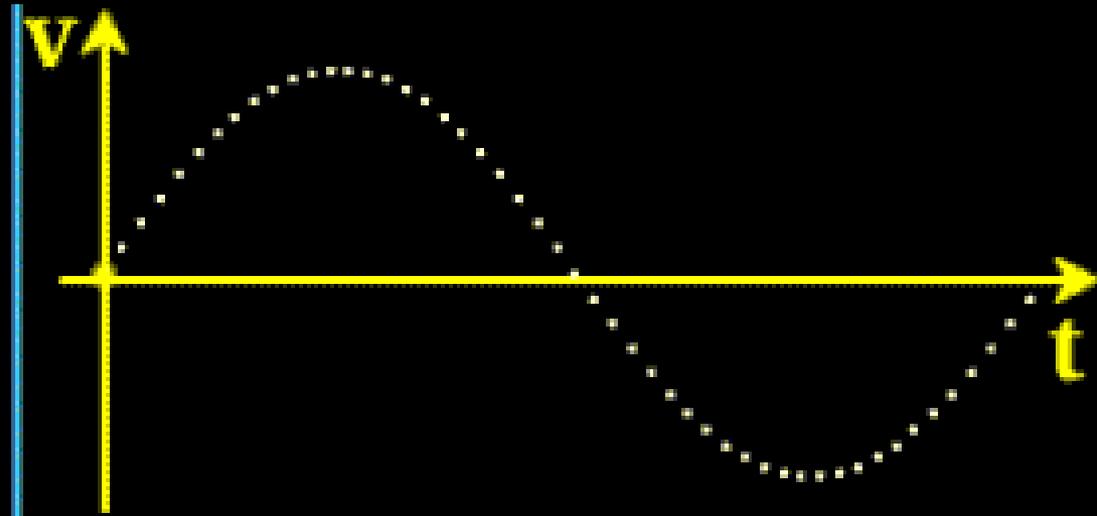
# EXOPLANÈTES : I a) Vélodimétrie

HOST STAR



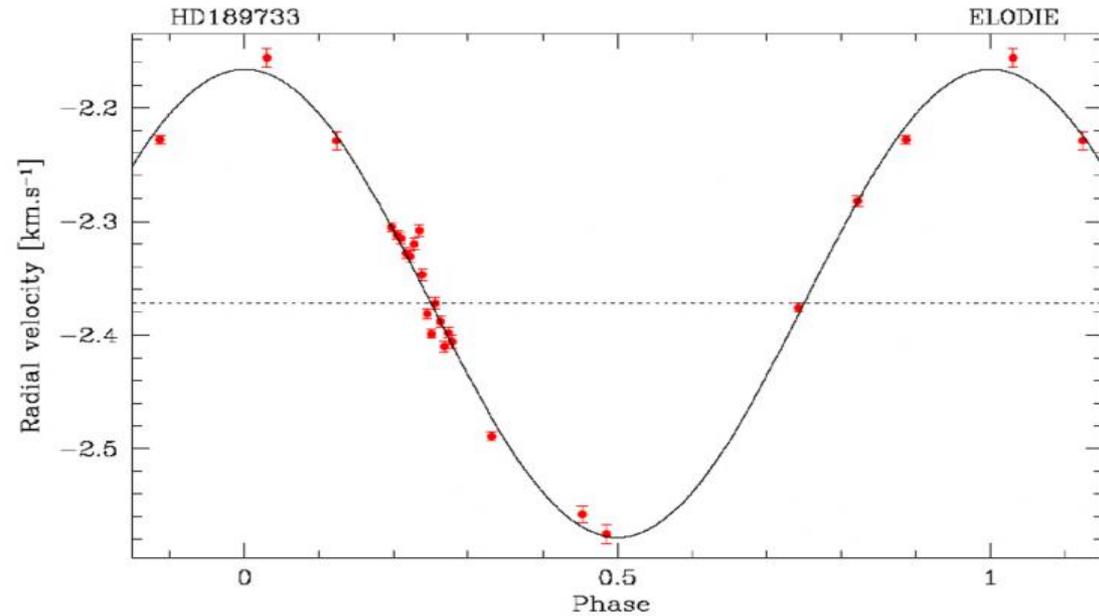
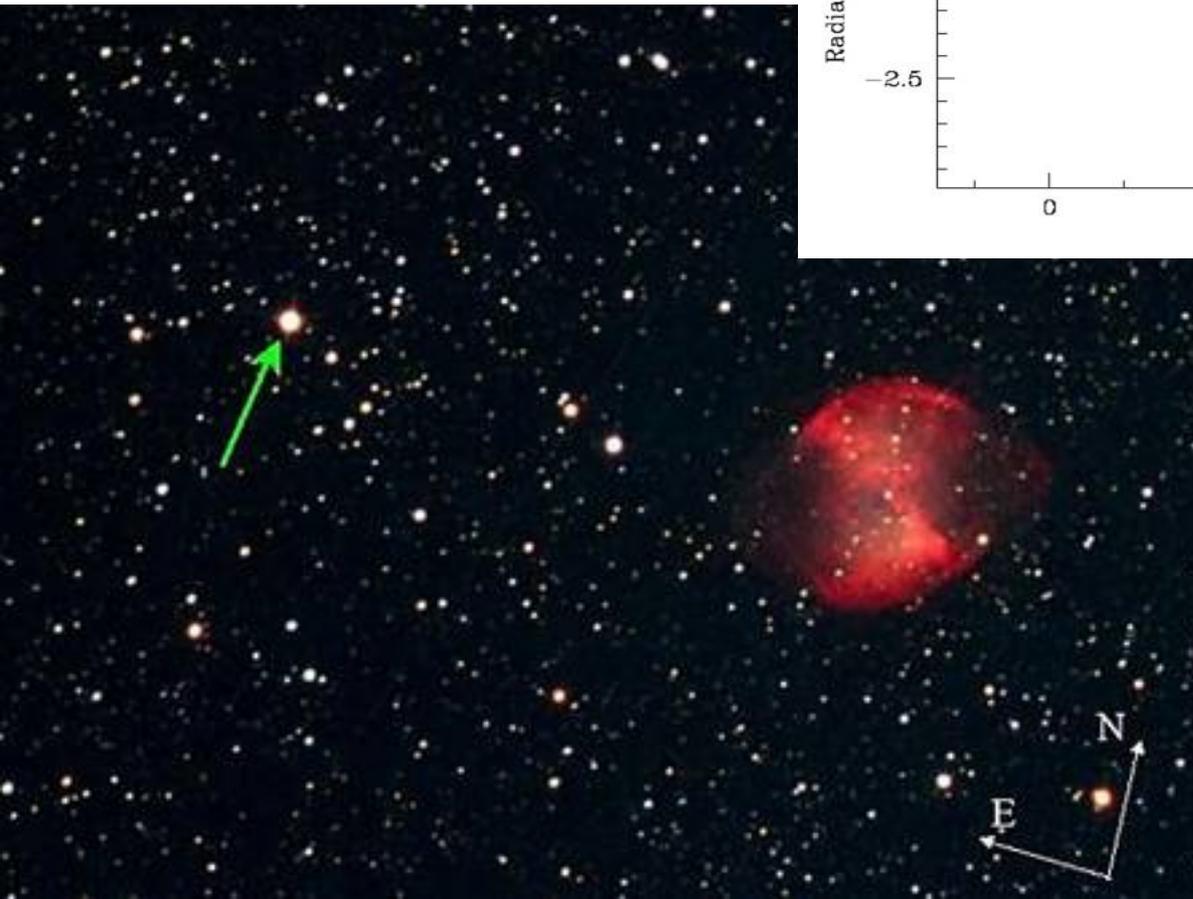
EXOPLANET

# EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie



# EXOPLANÈTES : I a) Vélodimétrie

Exemple : HD189733



ELODIE :

Spectromètre à l'Observatoire de Haute Provence : mesure les raies → la vitesse des étoiles.

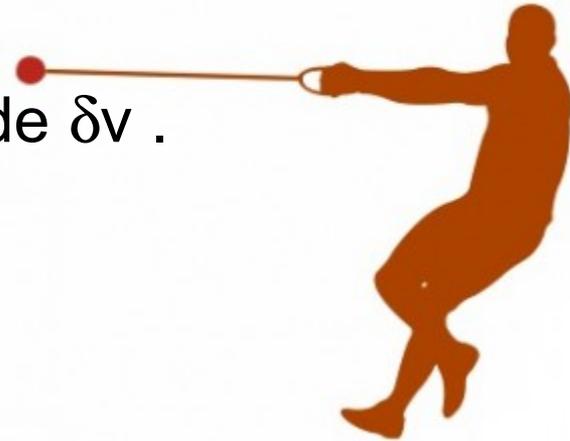
# EXOPLANÈTES : I a) Vélodimétrie

Le **demi grand axe**  $a$  est donné par la période  $T$ .  
( Loi de Képler :  $T^2 = (4\pi^2/GM_*)a^3$  )



La **masse**  $q=M_p/M_*$  est donnée par l'amplitude  $\delta v$  .

( Plus la planète est lourde,  
plus elle fait bouger son étoile)



## Application numérique :

Pour Jupiter,  $q=0,001$ ,  $a=5,2$  UA,  $\delta v = 13$  m/s.

Pour la Terre,  $q=0,000\ 003$ ,  $a=1$ UA,  $\delta v = 9$  cm/s.

# EXOPLANÈTES : I a) Vélodimétrie

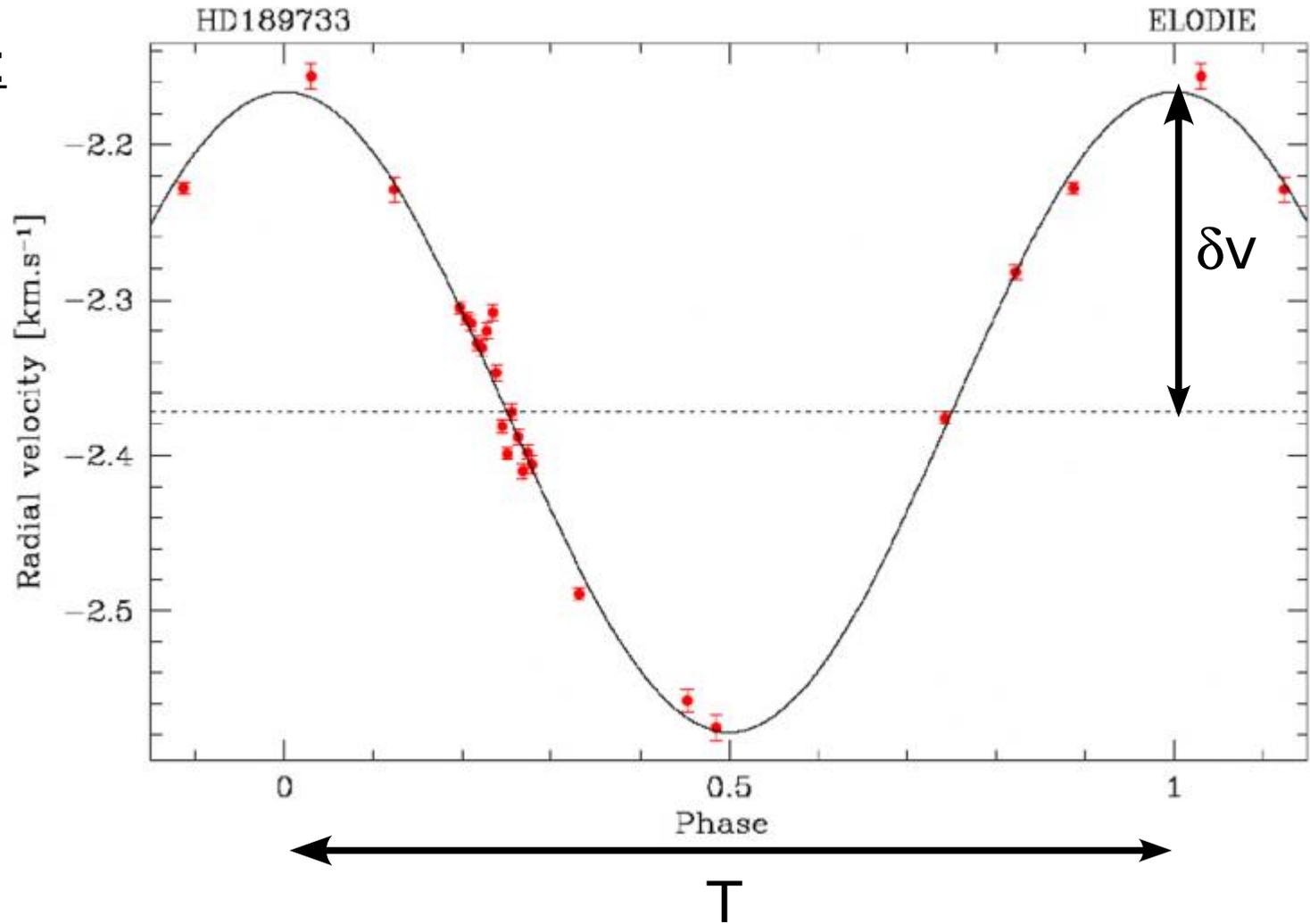
HD189733b :

On donne

$T=2,218$  jours,

$M_* = 1,6 \times 10^{30}$  kg.

Trouvez  $q$ ,  $M_p$ .



# EXOPLANÈTES : I a) Vélodimétrie

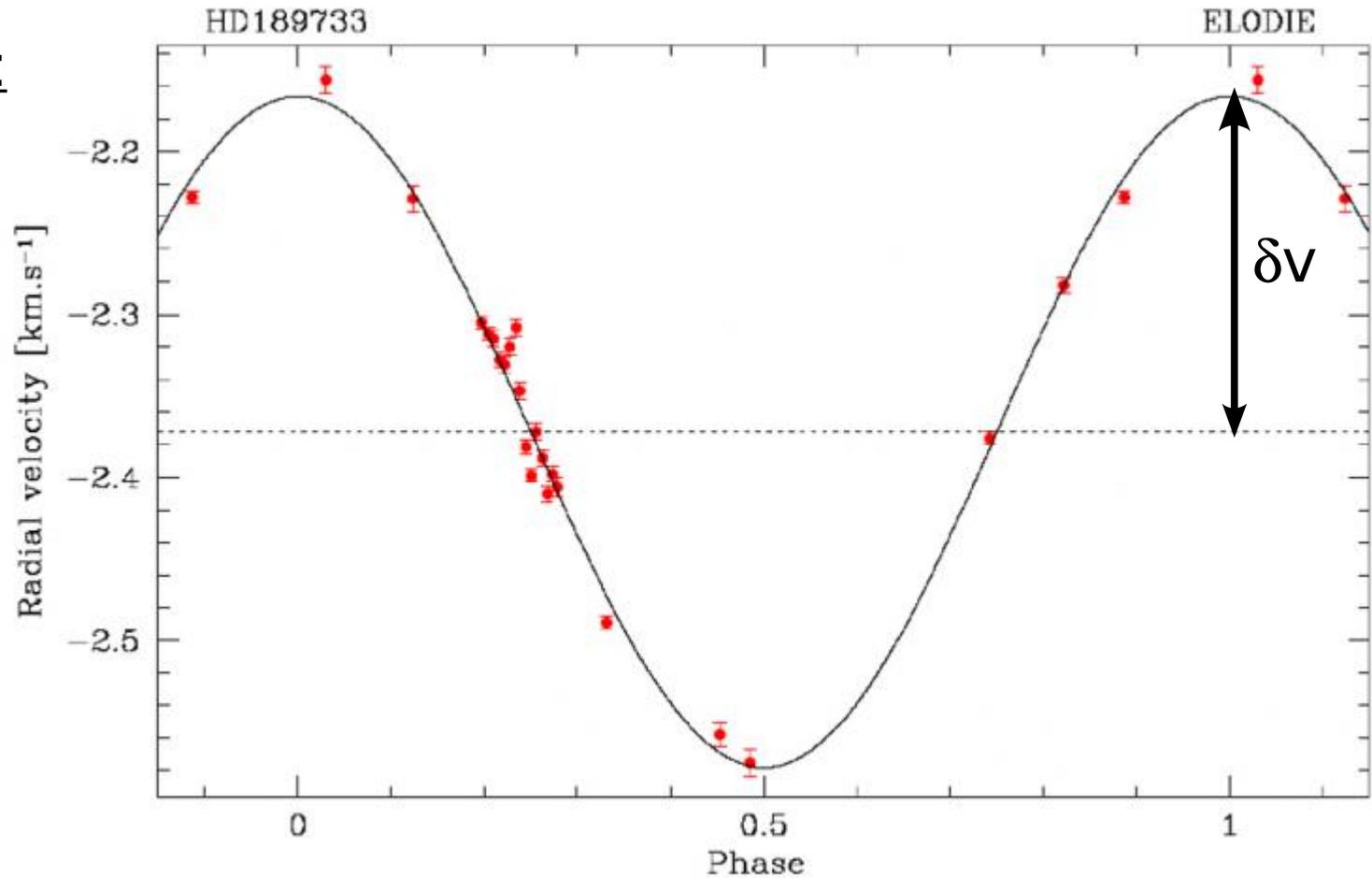
HD189733b :

On donne

$T=2,218$  jours,

$M_* = 1,6 \times 10^{30}$  kg.

Trouvez  $q$ ,  $M_p$ .



Solution:

$a = 4,64 \times 10^9$  m = 0.031 AU .  $\delta v = \sim 200$  m.s<sup>-1</sup>.

Donc  $q = 1,3 \times 10^{-3}$ , d'où  $M_p = 1,1 M_{\text{Jupiter}}$ .

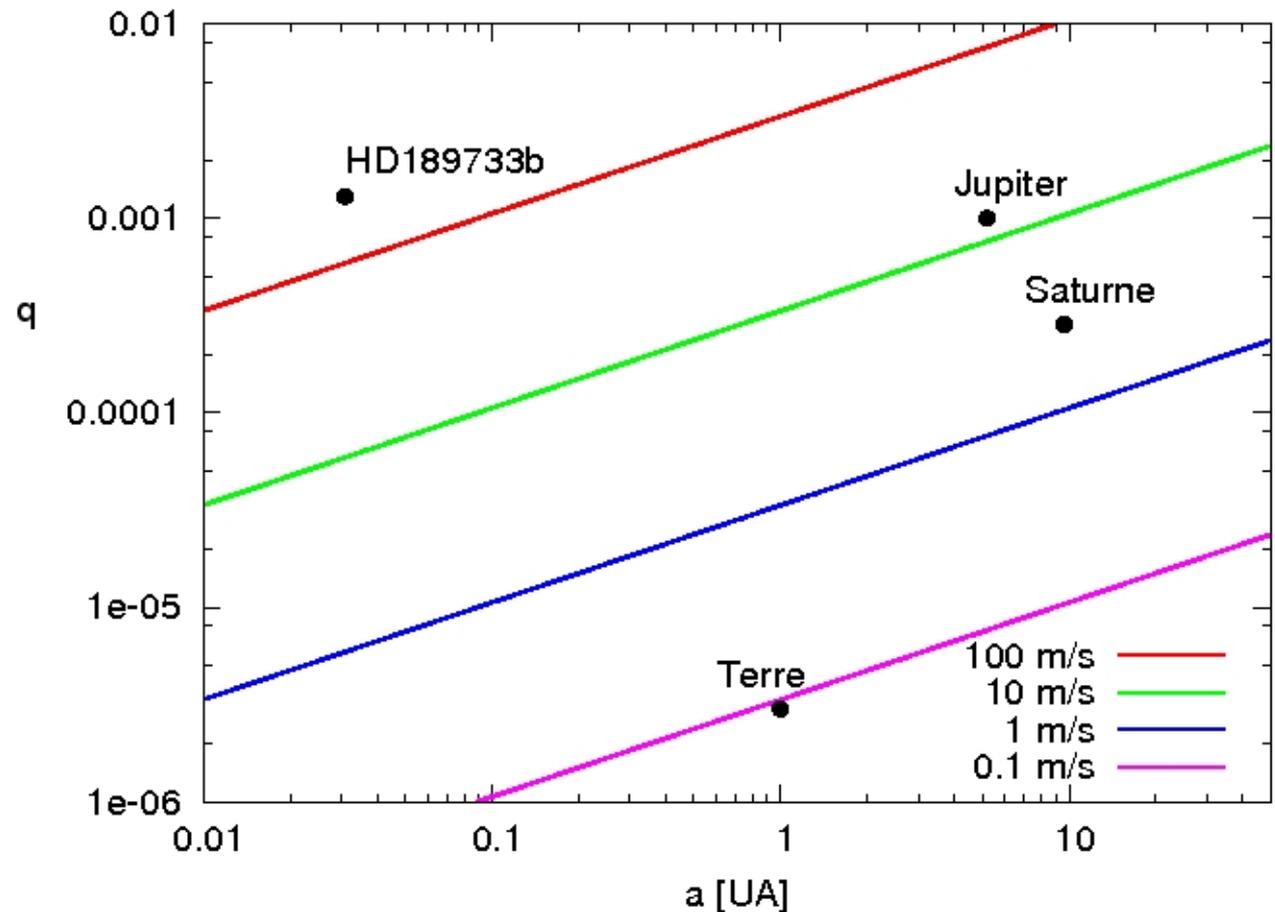
# EXOPLANÈTES : I a) Vélodimétrie

On mesure actuellement des différences de vitesse de l'ordre de moins de 1 m/s sur des étoiles de un million de km de diamètre ! C'est un exploit.

Déteetabilité :

$$\delta v = q (GM_*/a)^{1/2}.$$

Il est bien plus facile de détecter une planète géante proche de son étoile.



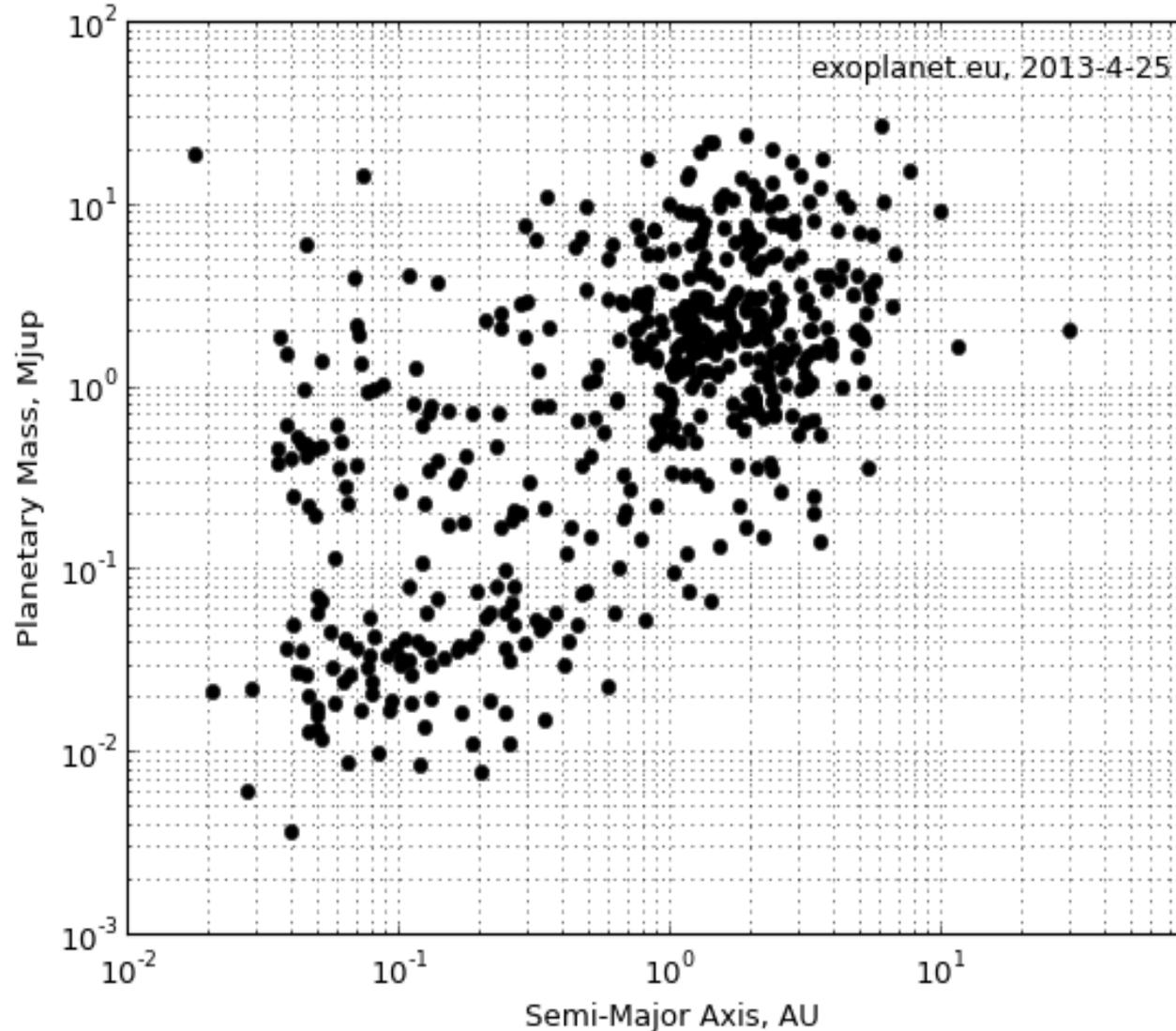
# EXOPLANÈTES : I a) Vélodimétrie

Détections : Les planètes détectées au 25/4/2013.

Attention :

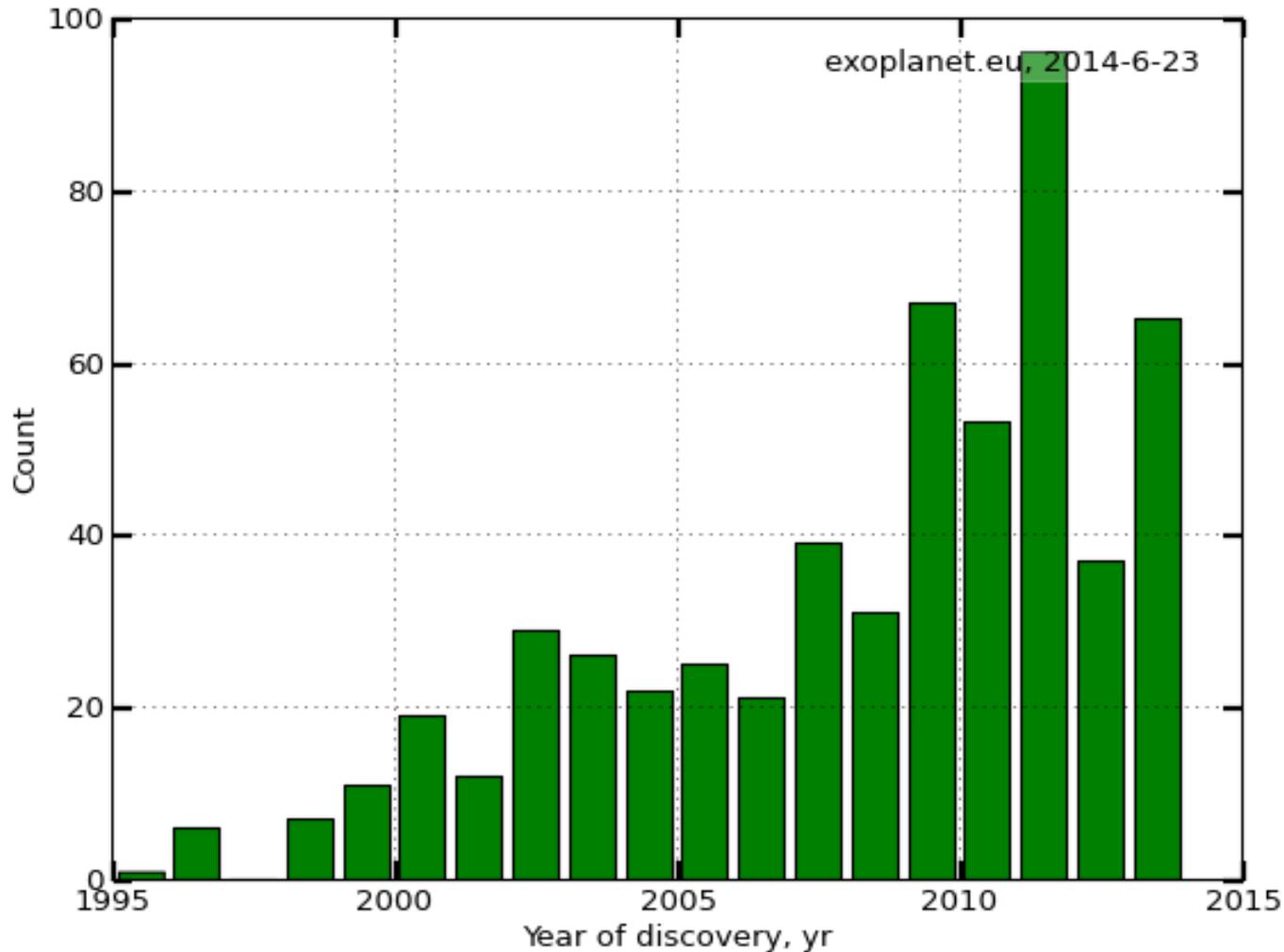
On n'a pas  $M_p$   
mais  $q = M_p / M_*$ .

Précisément,  
on mesure :  
 $M_p \sin(i) / M_*$ ,  
où  $i$  est l'inclinaison de l'orbite,  
inconnue...



# EXOPLANÈTES : I a) Vélodimétrie

Nombre de détections par an :



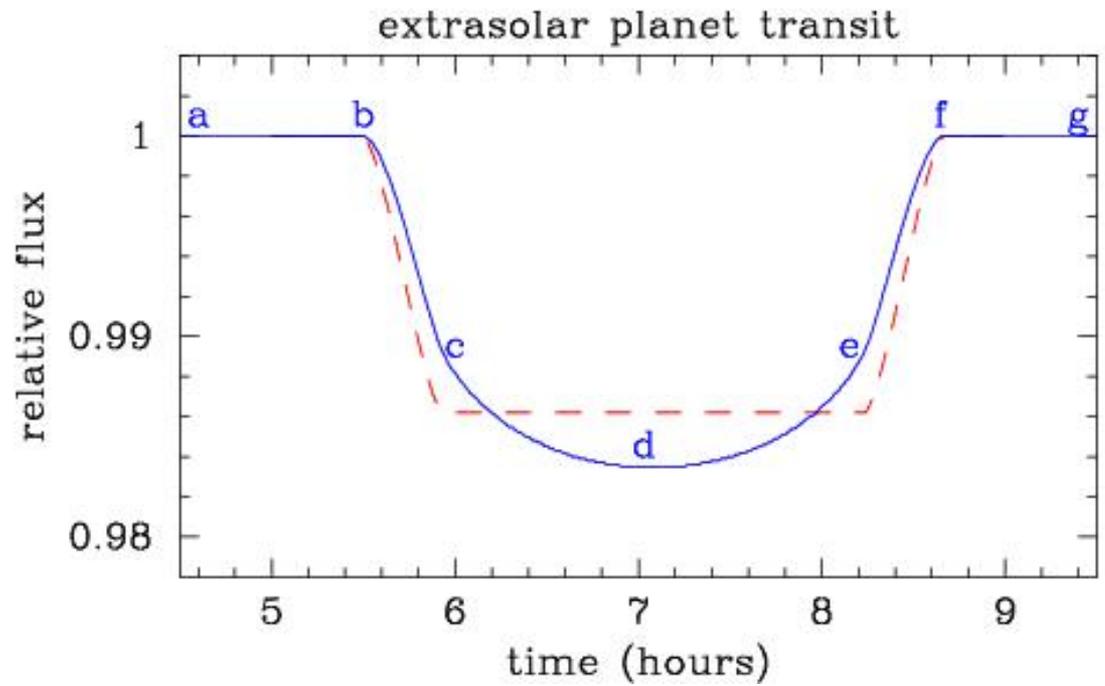
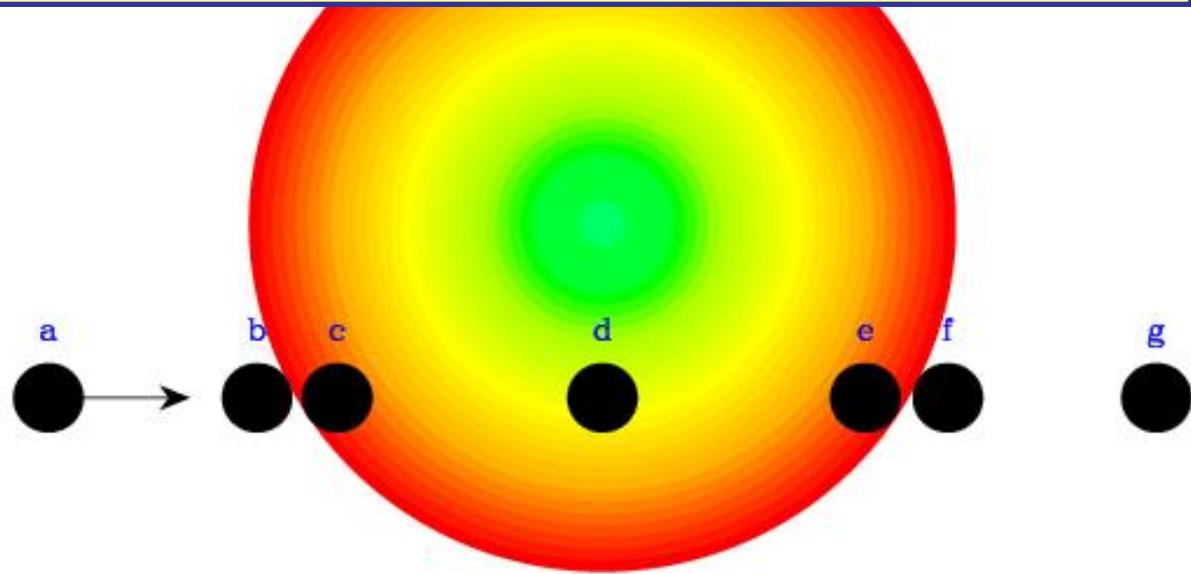
# EXOPLANÈTES : I b) Transit



# EXOPLANÈTES : I b) Transit

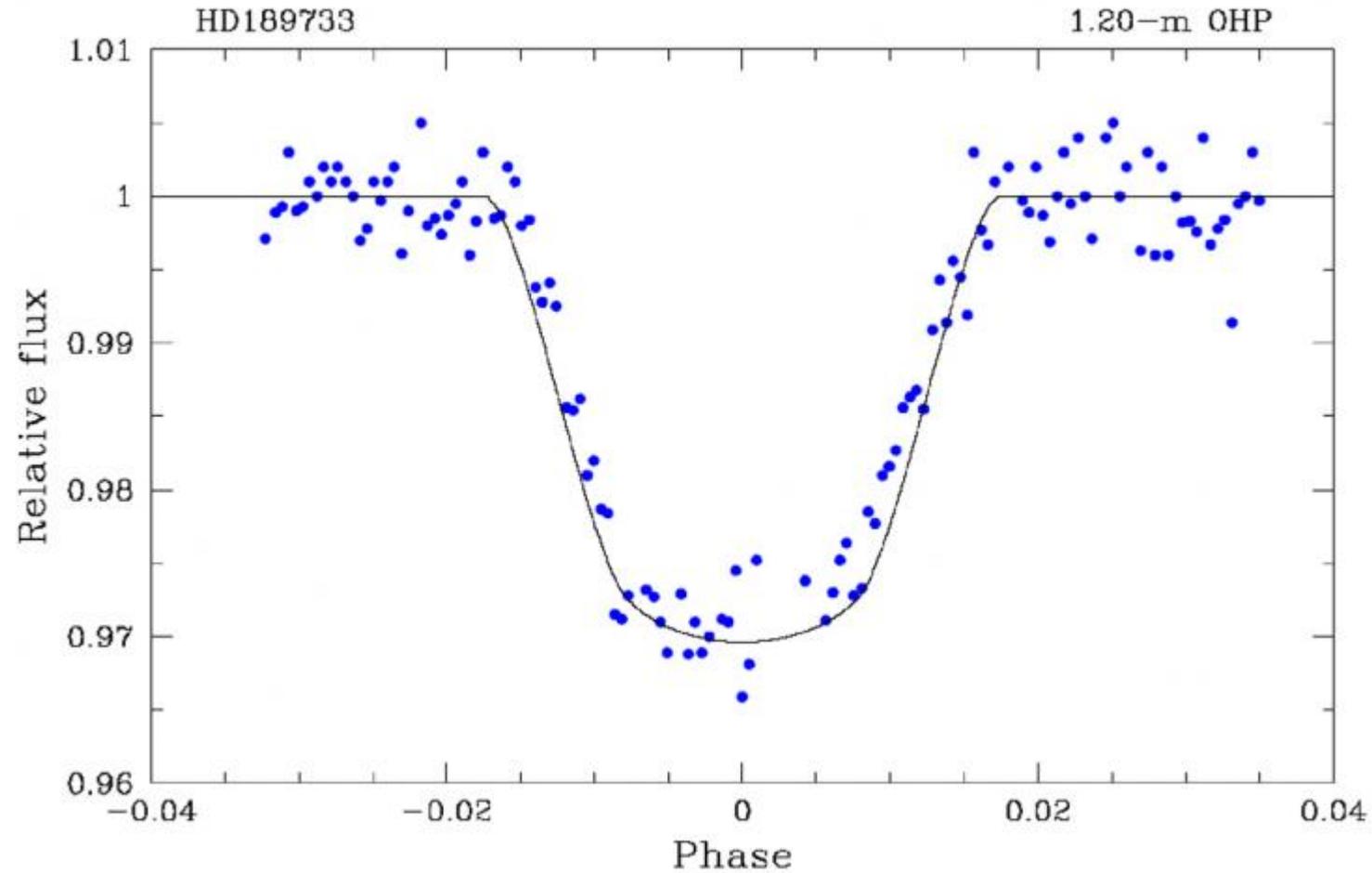
Comme Vénus devant le soleil en 2004 et 2012, parfois, une exoplanète passe devant son étoile, c'est un **transit**.

On ne voit pas l'ombre de la planète, mais on observe une baisse de luminosité de l'étoile :



# EXOPLANÈTES : I b) Transit

Ex: HD 189733b, vue en vitesse radiale, a aussi un transit :



# EXOPLANÈTES : I b) Transit

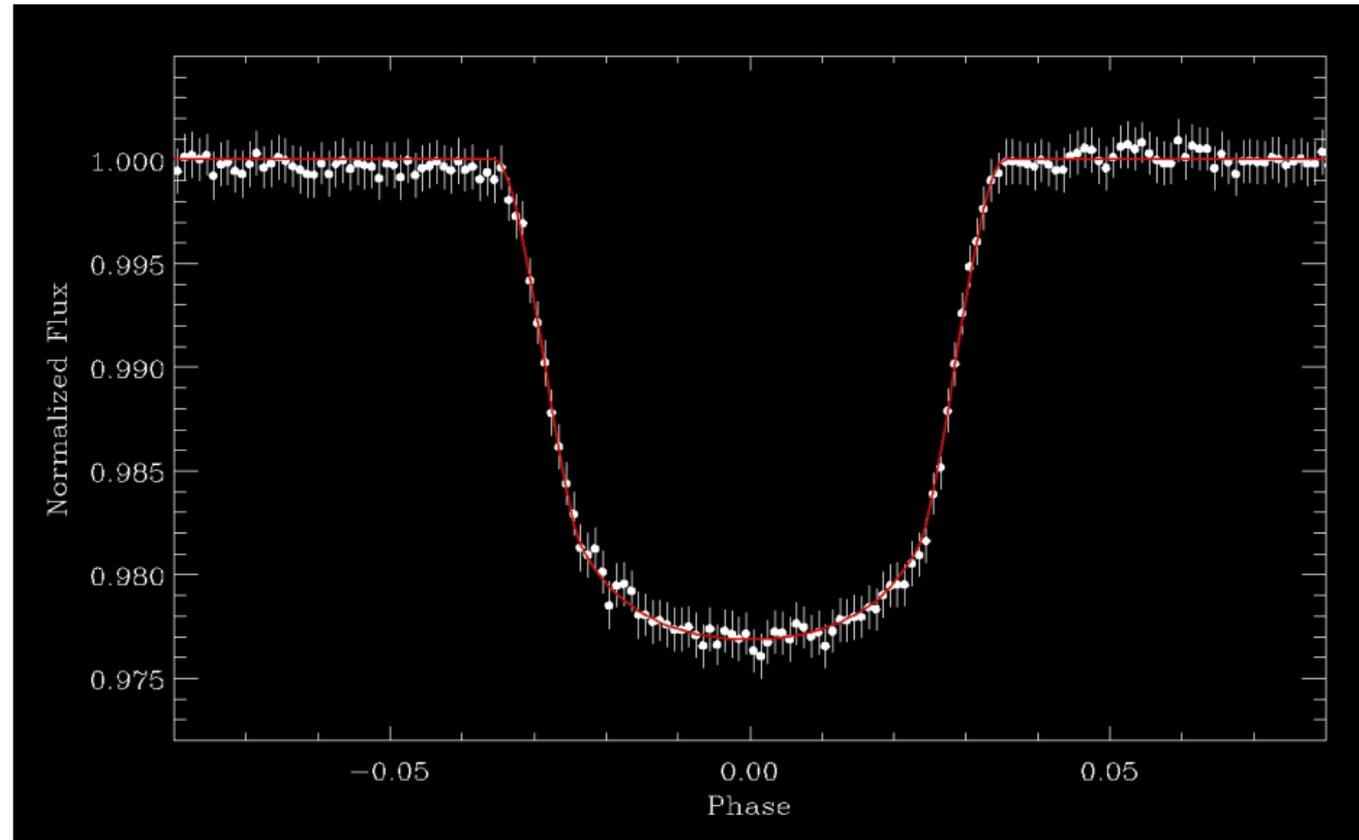


Corot : COnvection ROtation, et Transits

Voir séminaire d'Annie BAGLIN vendredi.

La première détection d'exoplanète par Corot:

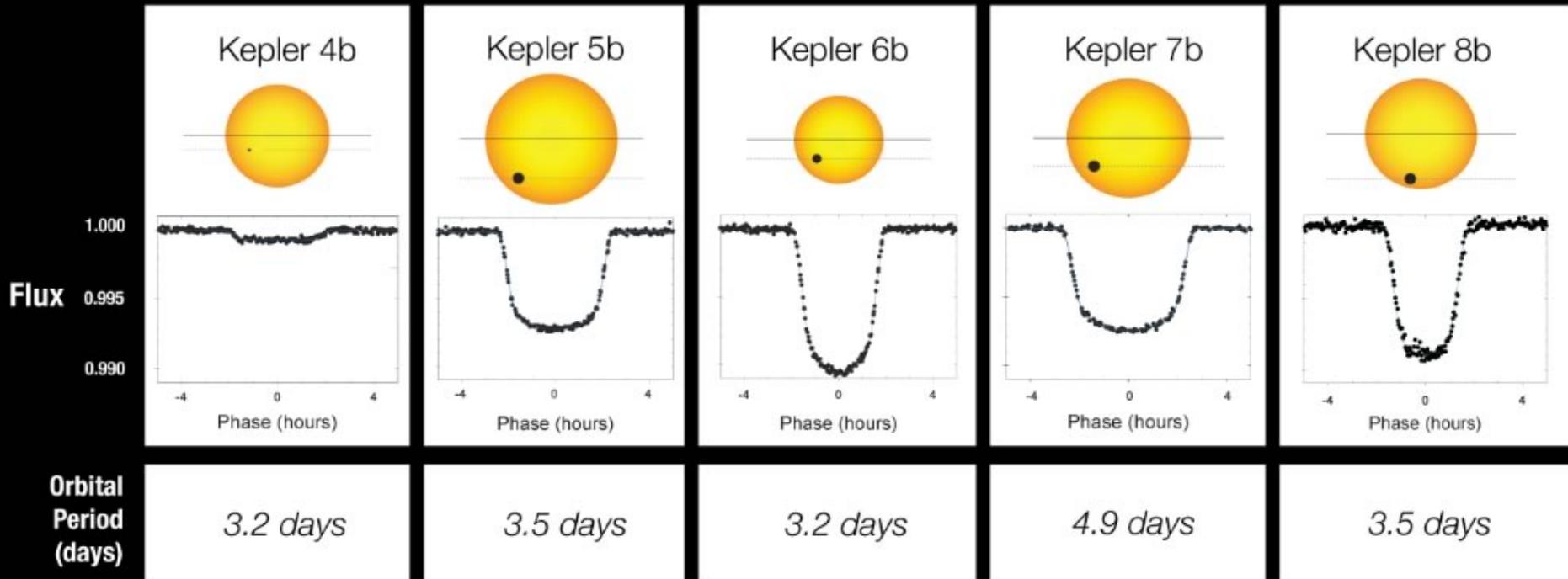
- ✓ Première super-terre en transit
- ✓ Première éclipse secondaire en lumière visible



Copyright Corot

# EXOPLANÈTES : I b) Transit

## Transit Light Curves



Concurrent américain : KEPLER

→ plus de 1200 candidats, à confirmer par observations complémentaires (vitesse radiale).

# EXOPLANÈTES : I b) Transit

A-STEP : Antartica Search for Transiting Extrasolar Planets, télescope automatique de 40cm au Dôme C, à Concordia, de 2010 à 2013 (après un premier télescope en 2008).

Responsable : Tristan GUILLOT

Autres collaborateurs de l'OCA :

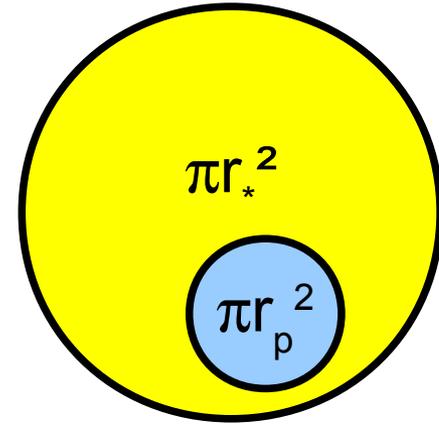
François FRESSIN, Lyu ABE, Karim AGABI, Mauro BARBIERI, E. BONDOUX, Serge BONHOMME, Yves BRESSON, Nicolas CROUZET, J-B DABAN, Michel DUGUÉ, Y. FANTEÏ-CAUJOLLE, Ivan GONCLAVES, C. GOUVRET, Djamel MEKARNIA, S. PERON, P-Y PETIT, Jean-Pierre RIVET, A. ROBINI, Alain ROUSSEL, Judit SZULAGYI, F-X SCHMIDER...

# EXOPLANÈTES : I b) Transit

Avantages du transit :

L'amplitude du transit donne  
le rayon de la planète :

$$\delta L/L = \pi r_p^2 / \pi r_*^2 = (r_p/r_*)^2$$



La période du transit donne le demi-grand axe (loi de Képler).

La vitesse radiale donne la masse.

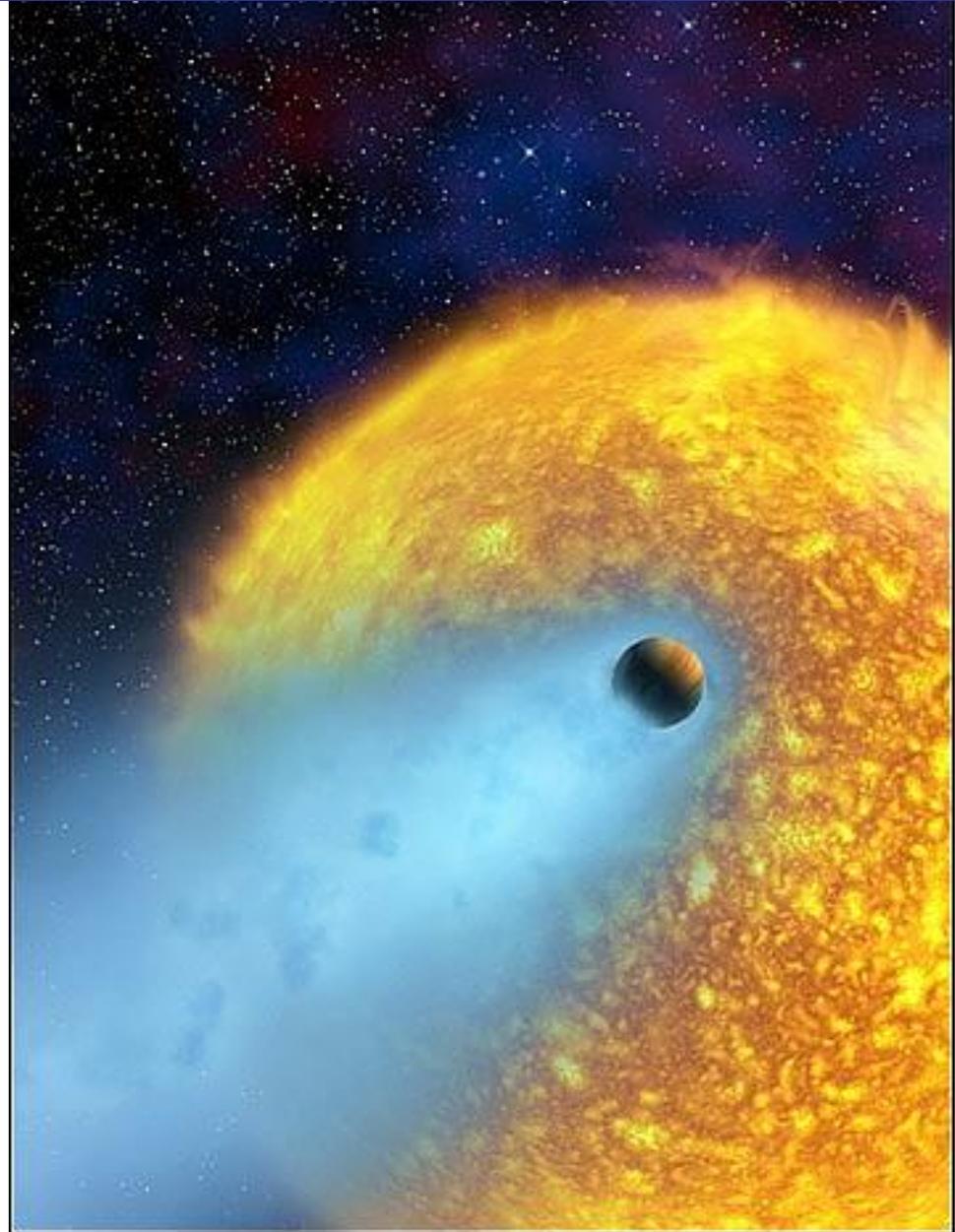
On en déduit donc la densité (moyenne) de la planète !

# EXOPLANÈTES : I b) Transit

Avantages du transit :

Surprises possibles...

Ex: HD209458b :  
grosse absorption en Ly $\alpha$   
lors du transit, comme si  
une atmosphère d'H  
de  $\sim r_*/3$  entourait la planète.

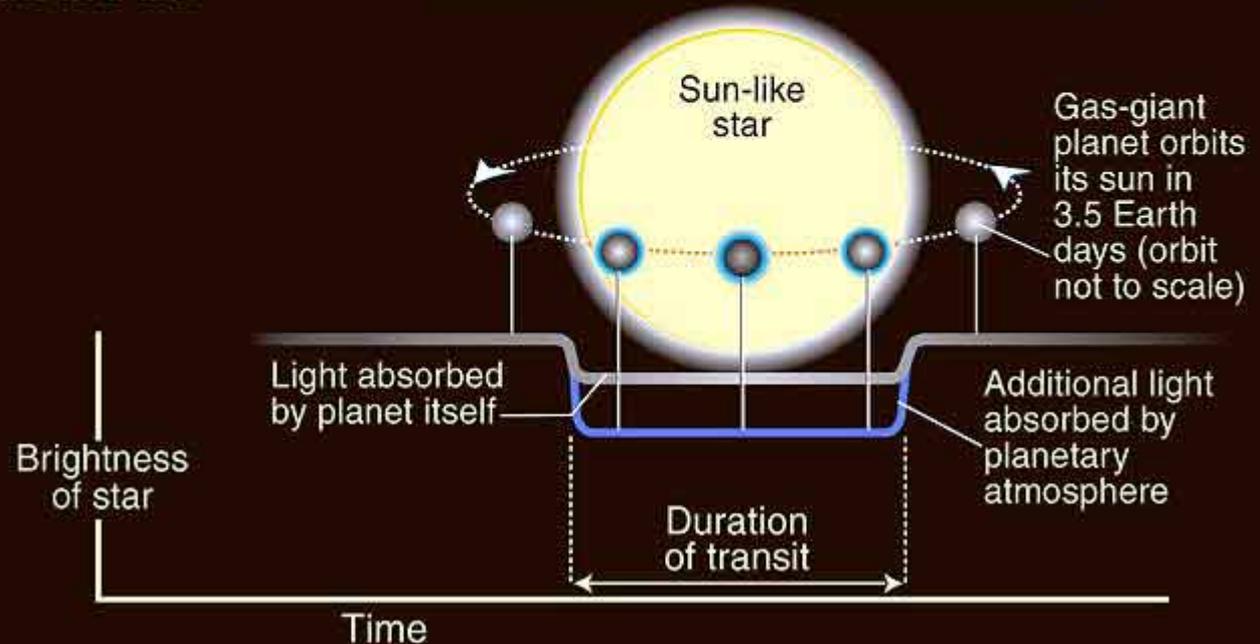
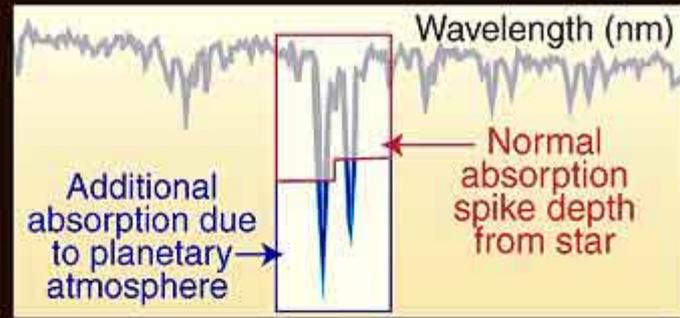


# EXOPLANÈTES : I b) Transit

## Avantages du transit :

Si l'atmosphère de la planète donne des raies d'absorption, composition !

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

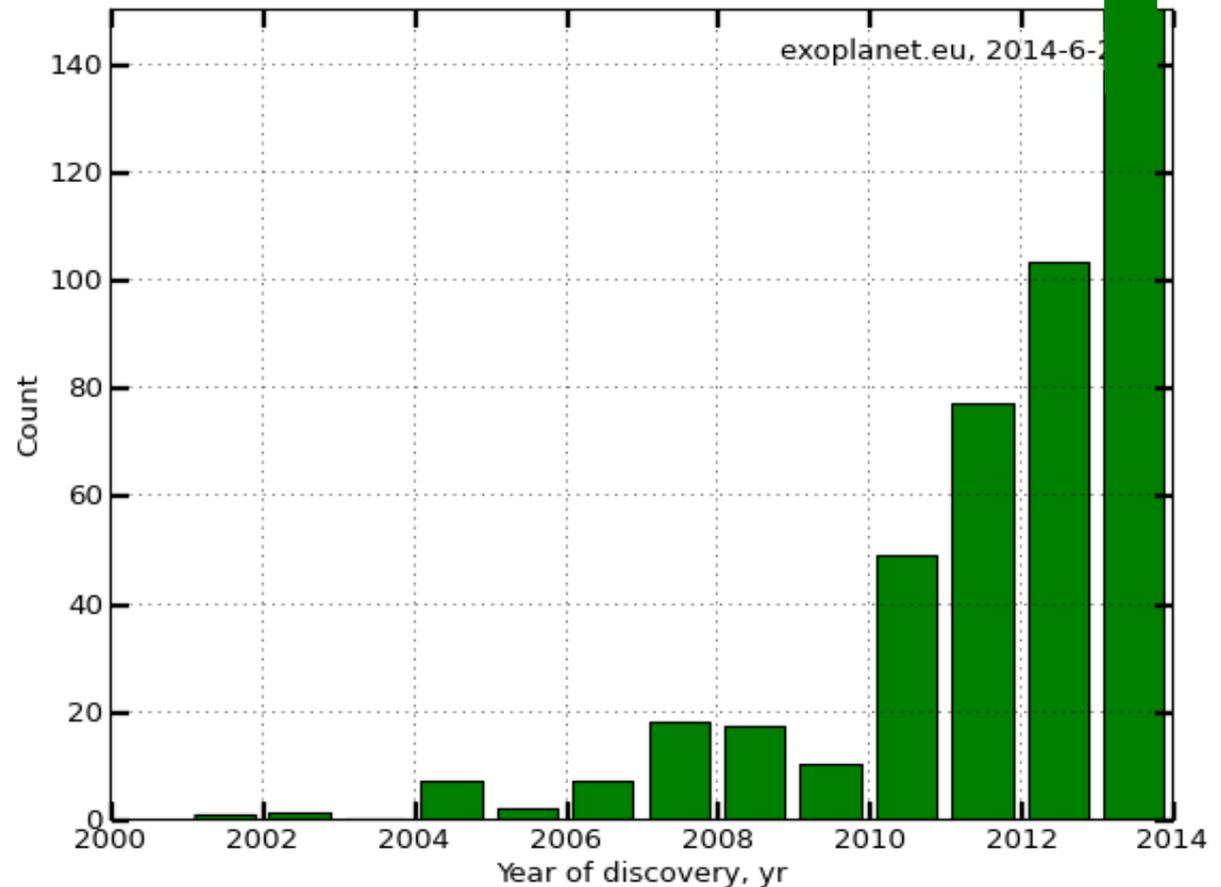


# EXOPLANÈTES : I b) Transit

## Détections :

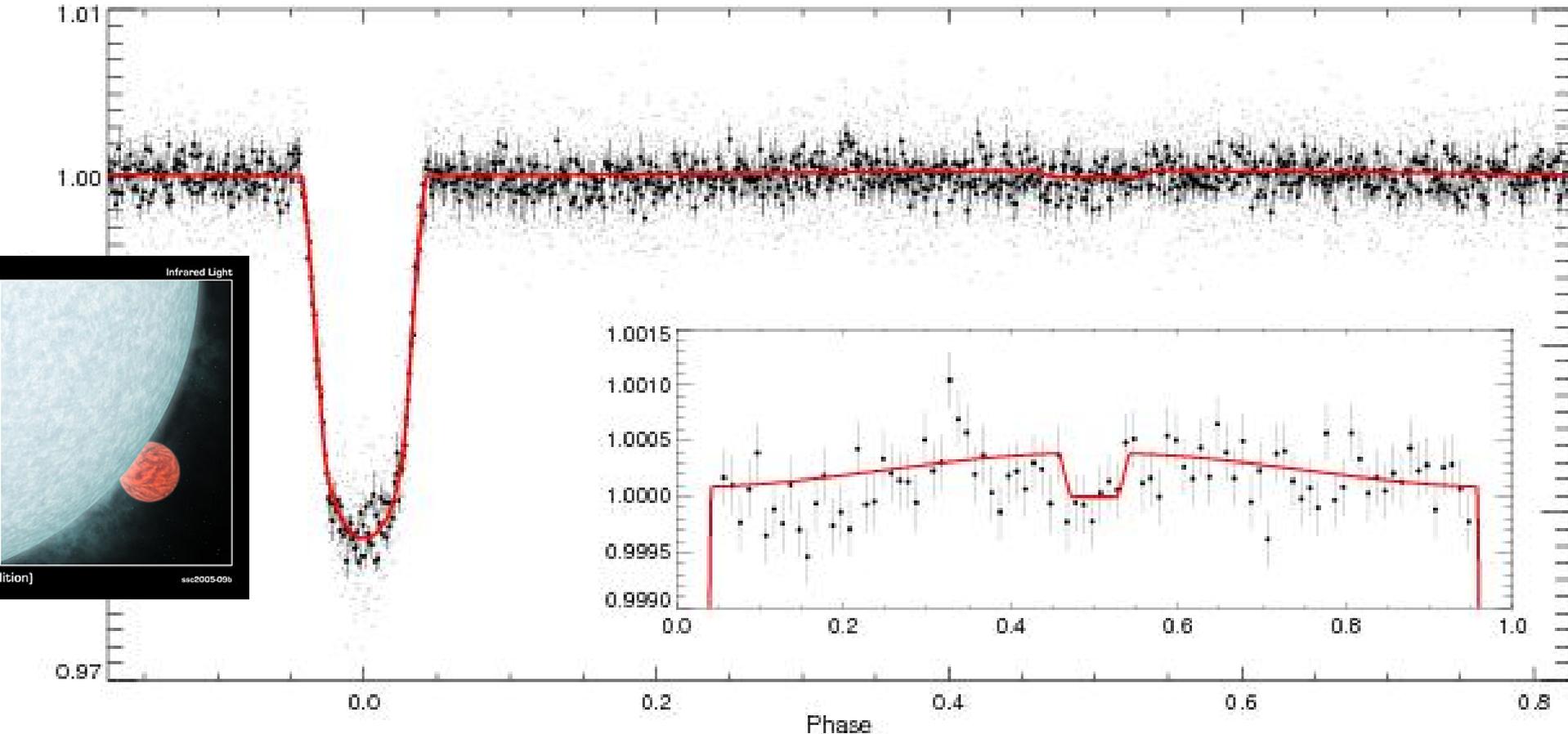
~420 planètes détectées par transit fin 2013,  
et confirmées par vélocimétrie.

Encore des centaines à venir...



# EXOPLANÈTES : I b') Transit secondaire

Quand la planète passe derrière l'étoile, sa luminosité disparaît. On en déduit la brillance de la planète, donc sa température...



Ex : Courbe de lumière de WASP-19 observée par A-STEP.  
→ la température de la planète WASP-19-b est  $\sim 2000^{\circ}\text{C}$ .  
(figure tirée de : L. Abe et al. 2013, voir film)

# EXOPLANÈTES : I b) Transit → PLATO



PLANetary Transits and Oscillations of stars :

Mission M3 de l'ESA, pour lancement en 2024.

European Space Agency  
Agence spatiale européenne

But : caractériser les planètes, mais aussi leurs étoiles hôtes.

En effet, si on a  $r_p/r_*$  et  $M_p/M_*$  mais pas  $r_*$  ni  $M_*$ , c'est embêtant  
(ex : thèse de Roxanne LIGI : « *Détermination des paramètres fondamentaux des étoiles hôtes d'exoplanètes en interférométrie optique* »)

Implication de l'OCA :

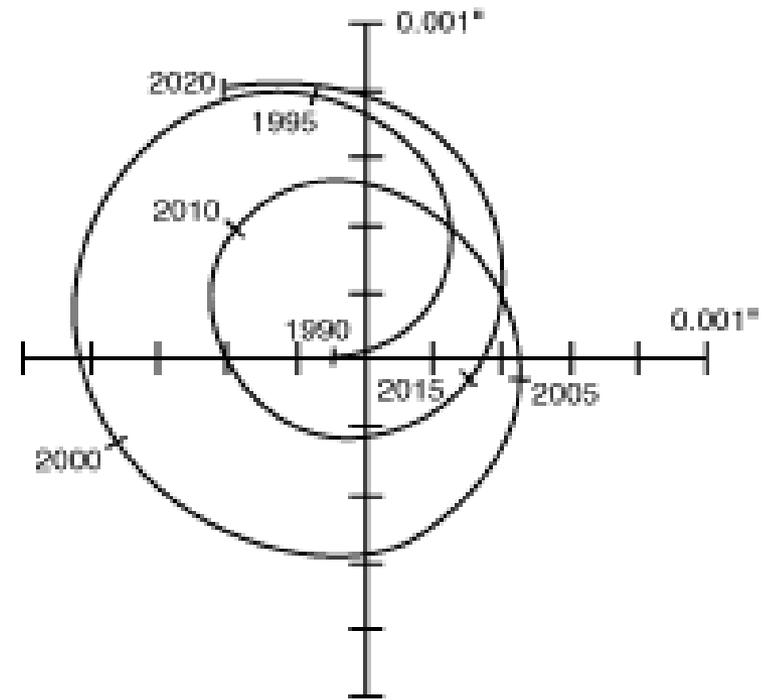
- Tristan GUILLOT responsable du groupe de travail :  
« Composition et Formation des planètes géantes ».
- Alejandra RECIO-BLANCO responsable du groupe de travail :  
« Analyse des performances spectroscopiques de GAIA » pour caractériser les étoiles observées ensuite par PLATO.

# EXOPLANÈTES : I c) Astrométrie → GAIA

En regardant la position des étoiles pendant 5 ans, GAIA va détecter ~ 5000 exoplanètes !

Avantages de cette technique (astrométrie) :

on peut mesurer le  $i$  de  $\sin(i)$  → connaître la masse exacte de chaque planète.



Ex : le mouvement du Soleil, vu d'une distance de 10pc.

# Méthodes de détection : résumé

## - Imagerie directe :

→ distance à l'étoile + brillance et spectre de la planète.  
À suivre avec SPHERE.

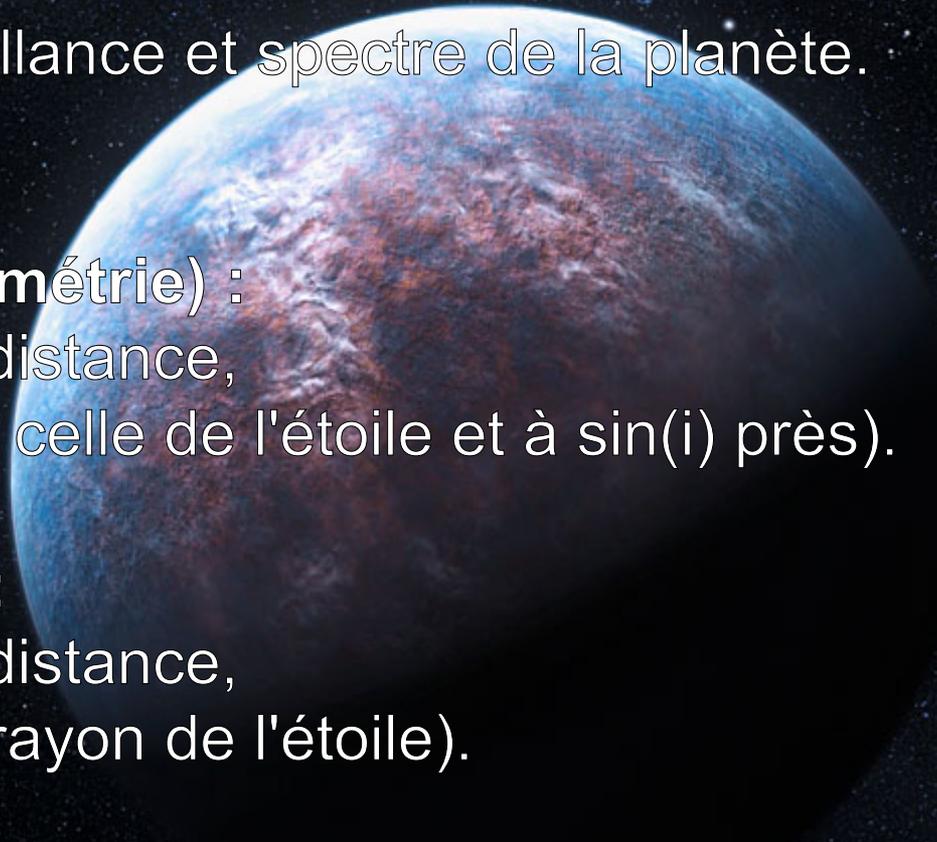
## - Vitesse radiale (vélocimétrie) :

→ période orbitale donc distance,  
→ masse (en fonction de celle de l'étoile et à  $\sin(i)$  près).

## - Transit (photométrie) :

→ période orbitale donc distance,  
→ rayon (en fonction du rayon de l'étoile).  
À suivre avec PLATO.

## - Astrométrie : à suivre avec GAIA.



# Introduction

- Existence, Observation directe
- Équation de Drake

## I Méthodes de détection indirectes

- Vitesse radiale (vélocimétrie)
- Transit (photométrie)

## II Propriétés, Habitabilité

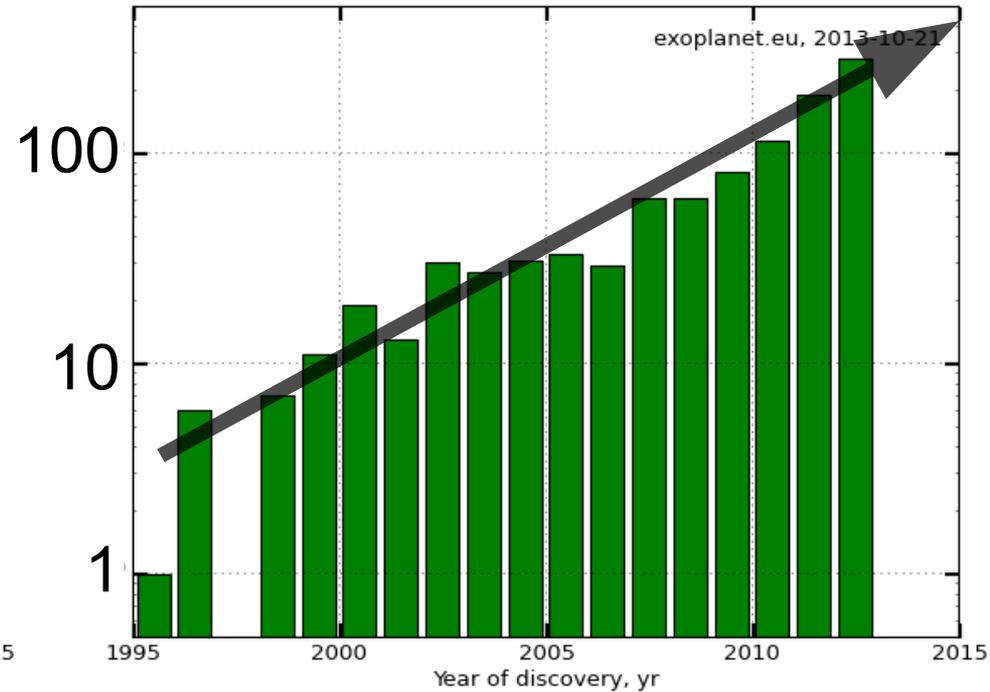
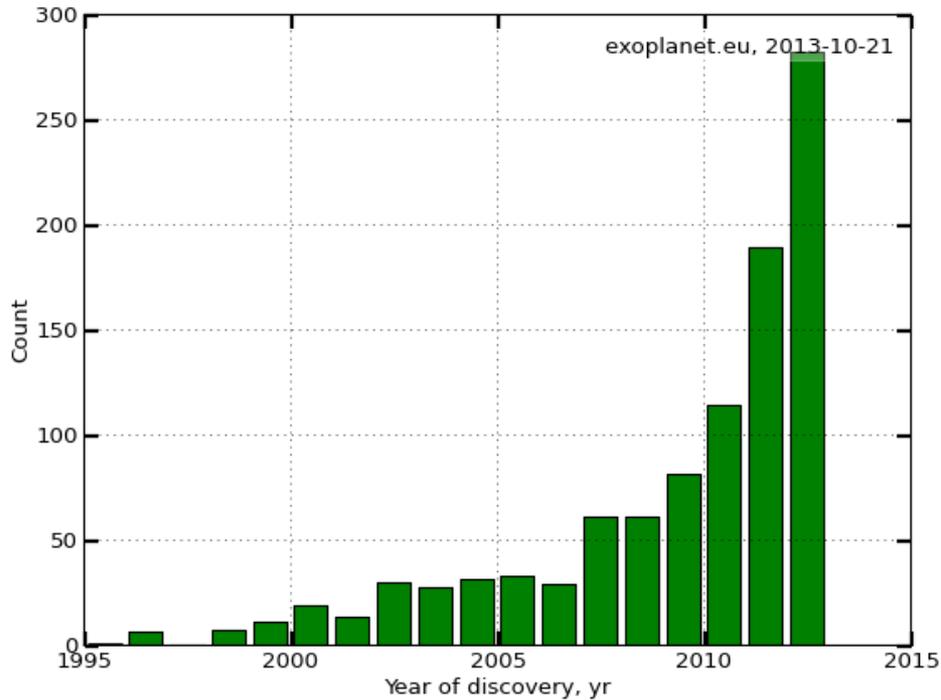
- Classes d'exoplanètes
- Conditions d'habitabilité, zone habitable.

## Conclusion : le paradoxe de Fermi



# EXOPLANÈTES

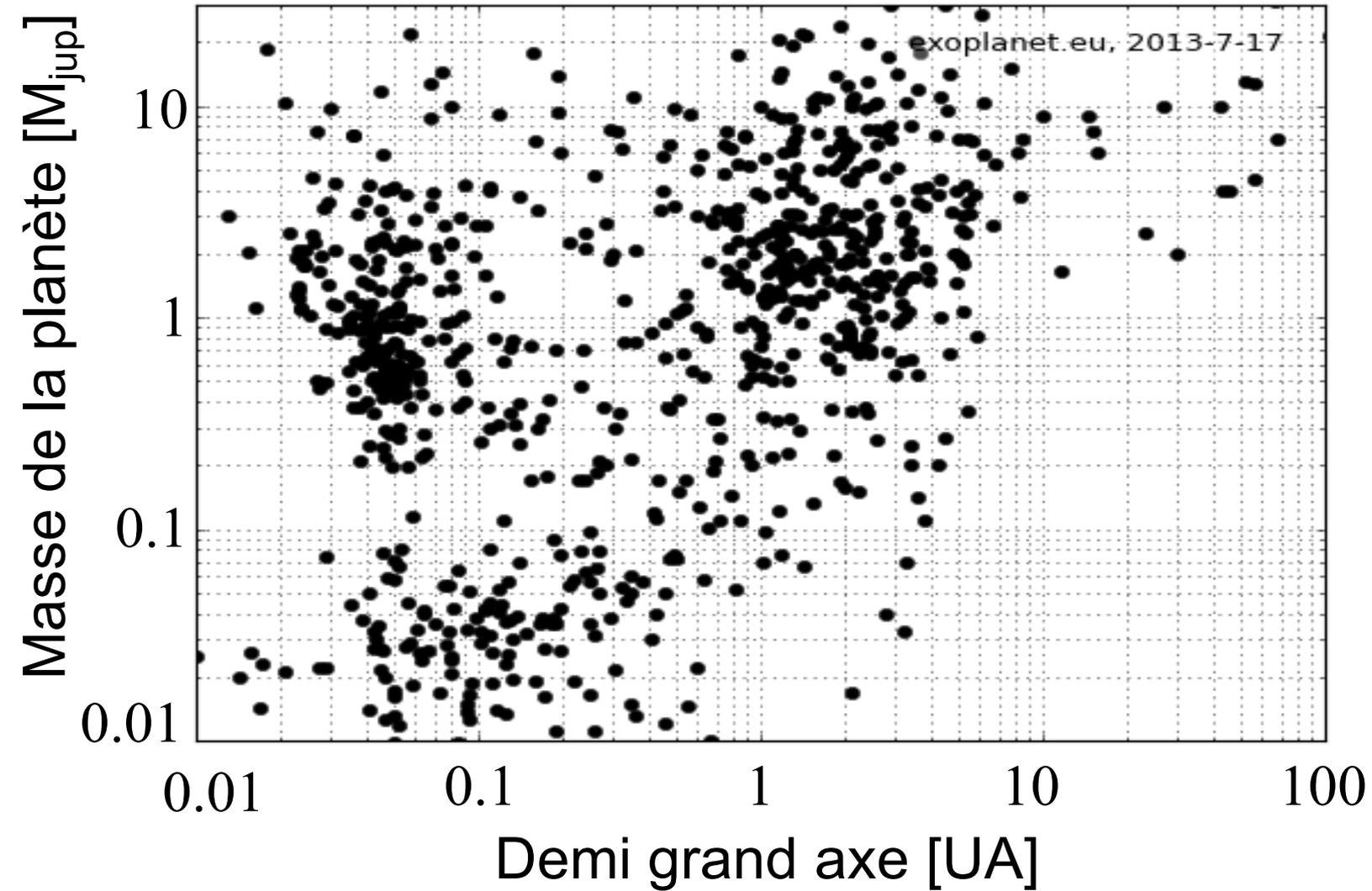
Nombre de détection par an : une croissance exponentielle.



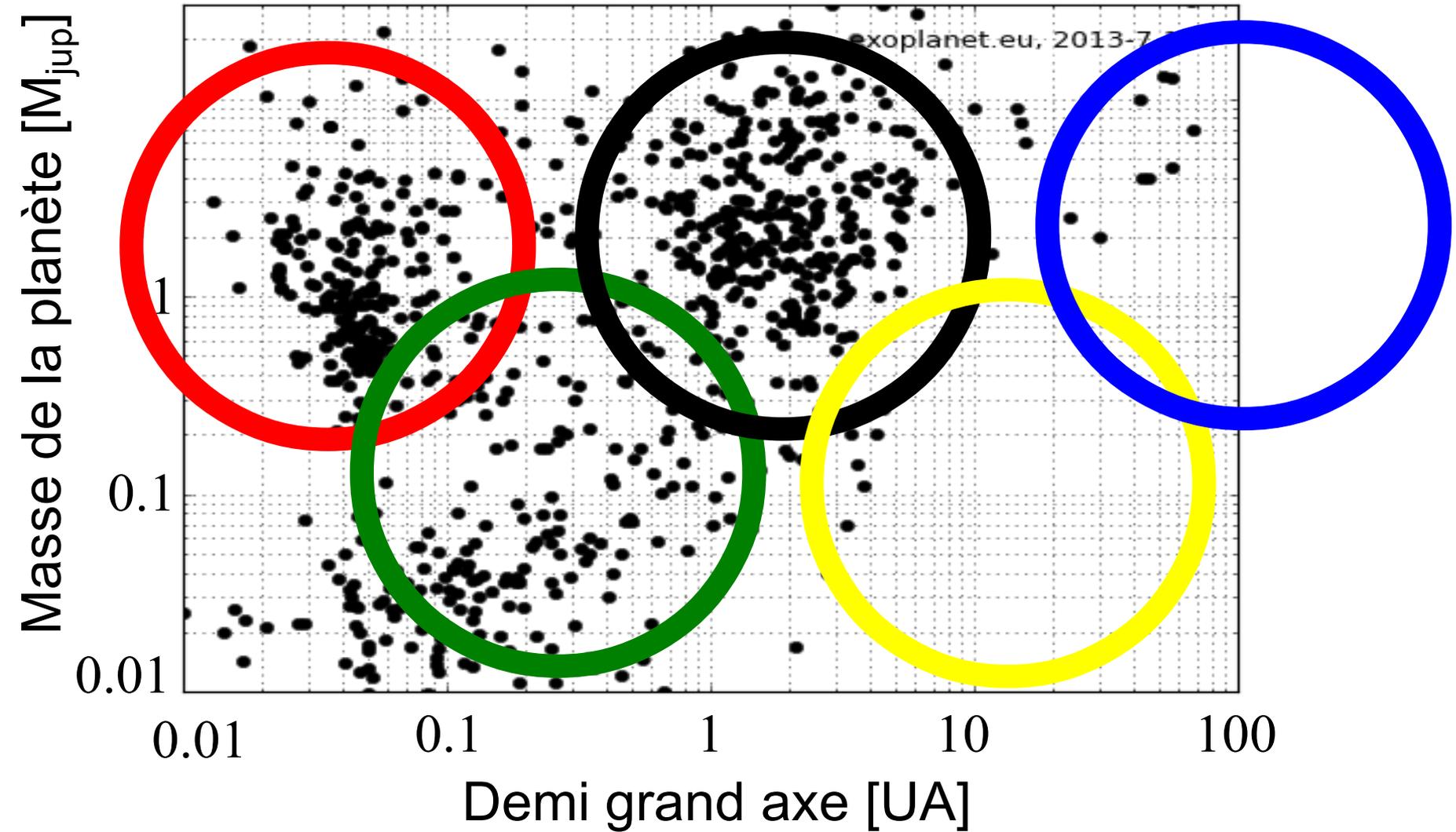
0 exoplanètes connues en 1993,

plus de 1000 exoplanètes connues en octobre 2013.

# EXOPLANÈTES



# EXOPLANÈTES



# EXOPLANÈTES

## Over 1000 Confirmed Exoplanets

Terrestrial

Gas Giants

3

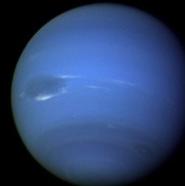
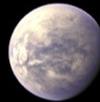
7

11

114

148

727



**Mercurian**  
*Mercury-Size*

**Subterran**  
*Mars-Size*

**Terran**  
*Earth-Size*

**Superterran**  
*SuperEarth-Size*

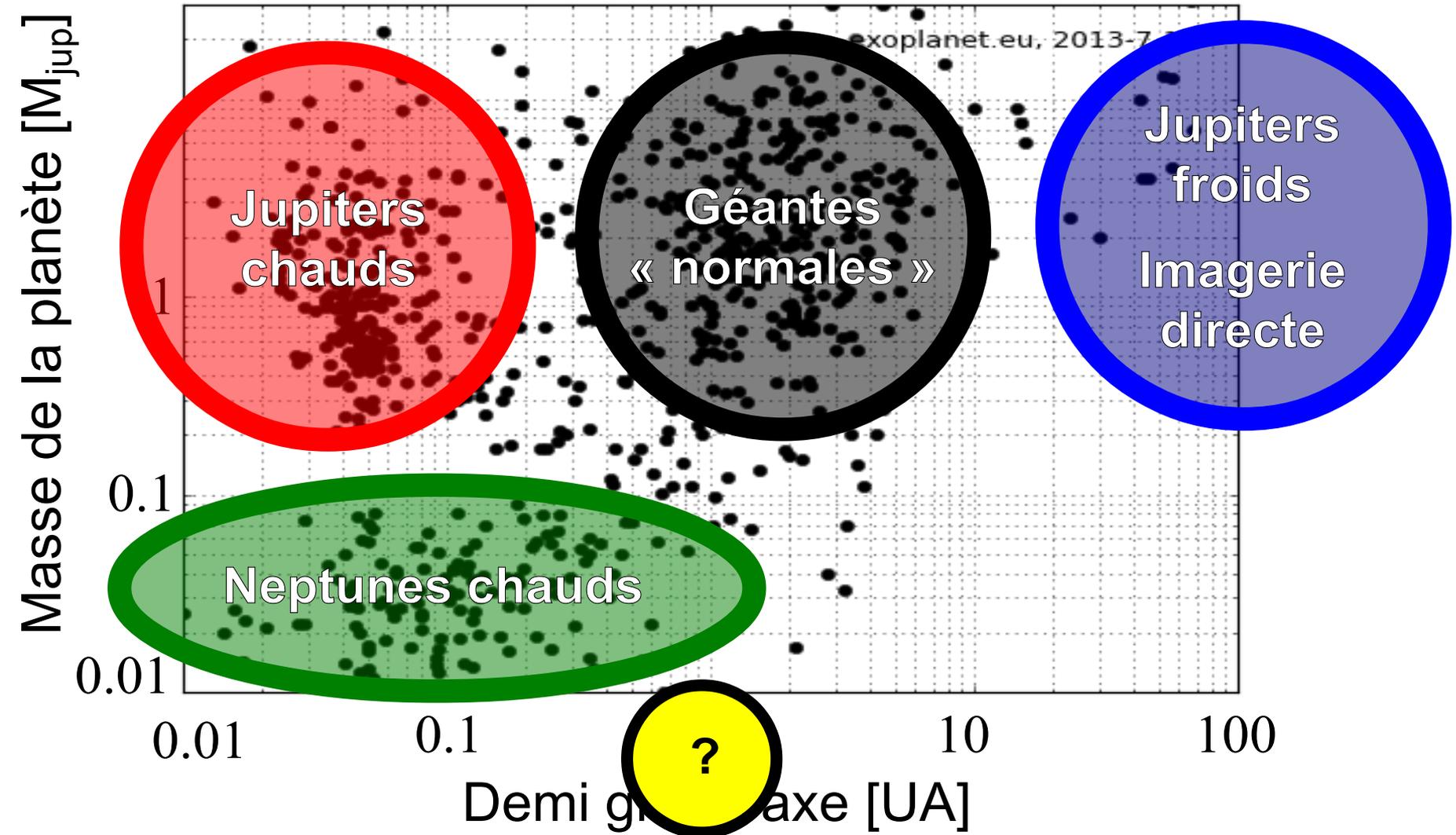
**Neptunian**  
*Neptune-Size*

**Jovian**  
*Jupiter-Size*

*Number of confirmed exoplanets in each category are in red, total 1010.*

*Credit: PHL @ UPR Arcibo, Oct 2013*

# EXOPLANÈTES



# HABITABILITE

Habitables ? Définissons une planète habitable.

Il faut qu'elle soit tellurique (de type terrestre, et pas gazeuse).

Il faut qu'il y fasse ni trop froid, ni trop chaud (on veut de l'eau liquide). → Pas trop près ni trop loin de l'étoile...

Franchement habitable

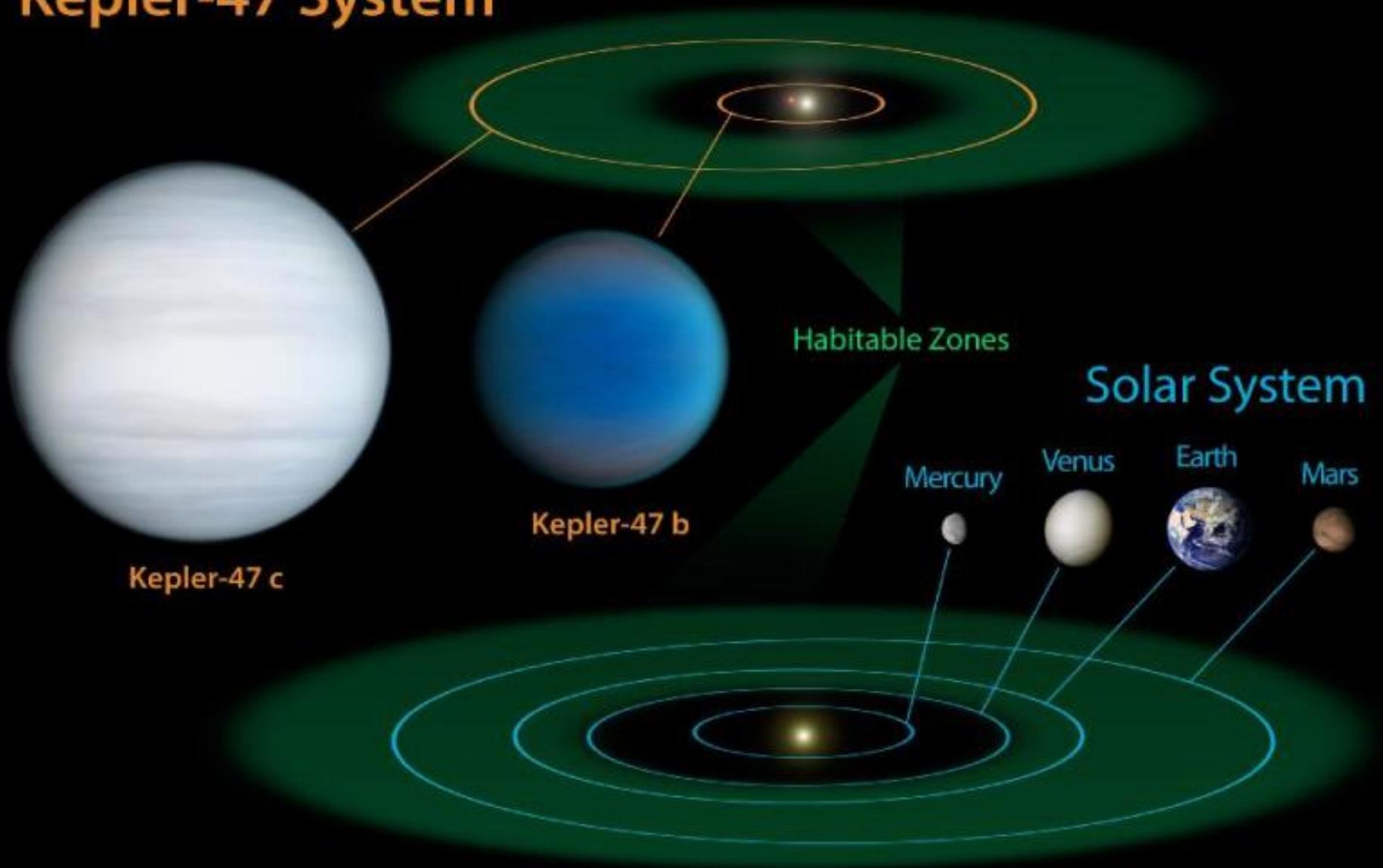


Pas top habitable



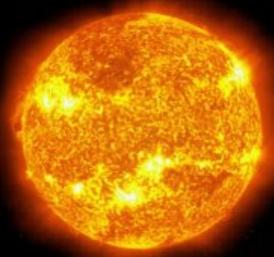
# ZONE HABITABLE

## Kepler-47 System



Planets and orbits to scale

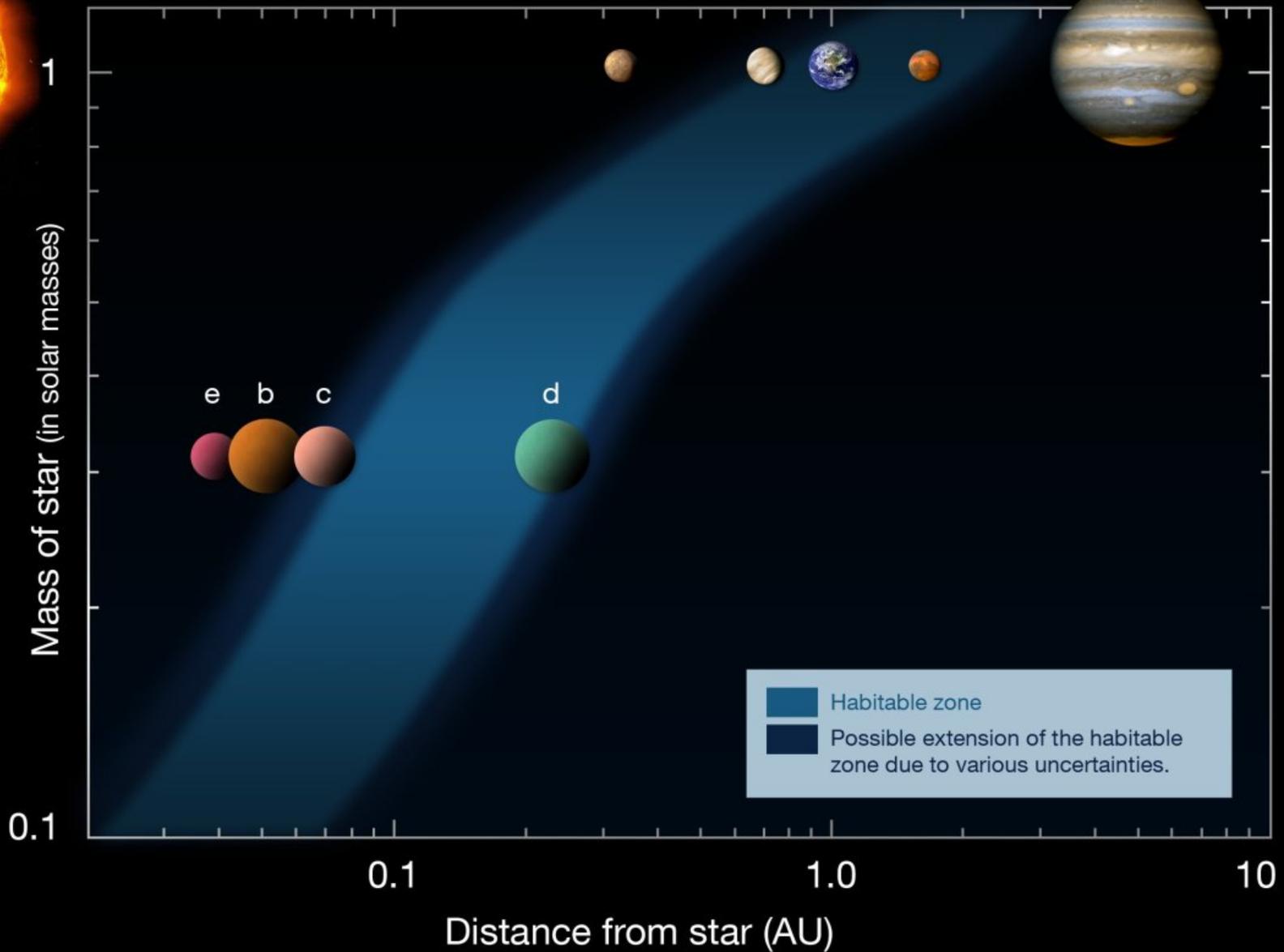
# ZONE HABITABLE



Sun



Gliese 581



 Habitable zone  
 Possible extension of the habitable zone due to various uncertainties.

# HABITABILITE

Habitables ? Définissons une planète habitable.

Il faut qu'elle soit tellurique (de type terrestre, et pas gazeuse).

Il faut qu'il y fasse ni trop froid, ni trop chaud (on veut de l'eau liquide).

+ tectonique des plaques

+ climat stable

+ pas trop de bombardement météoritique

+ champ magnétique

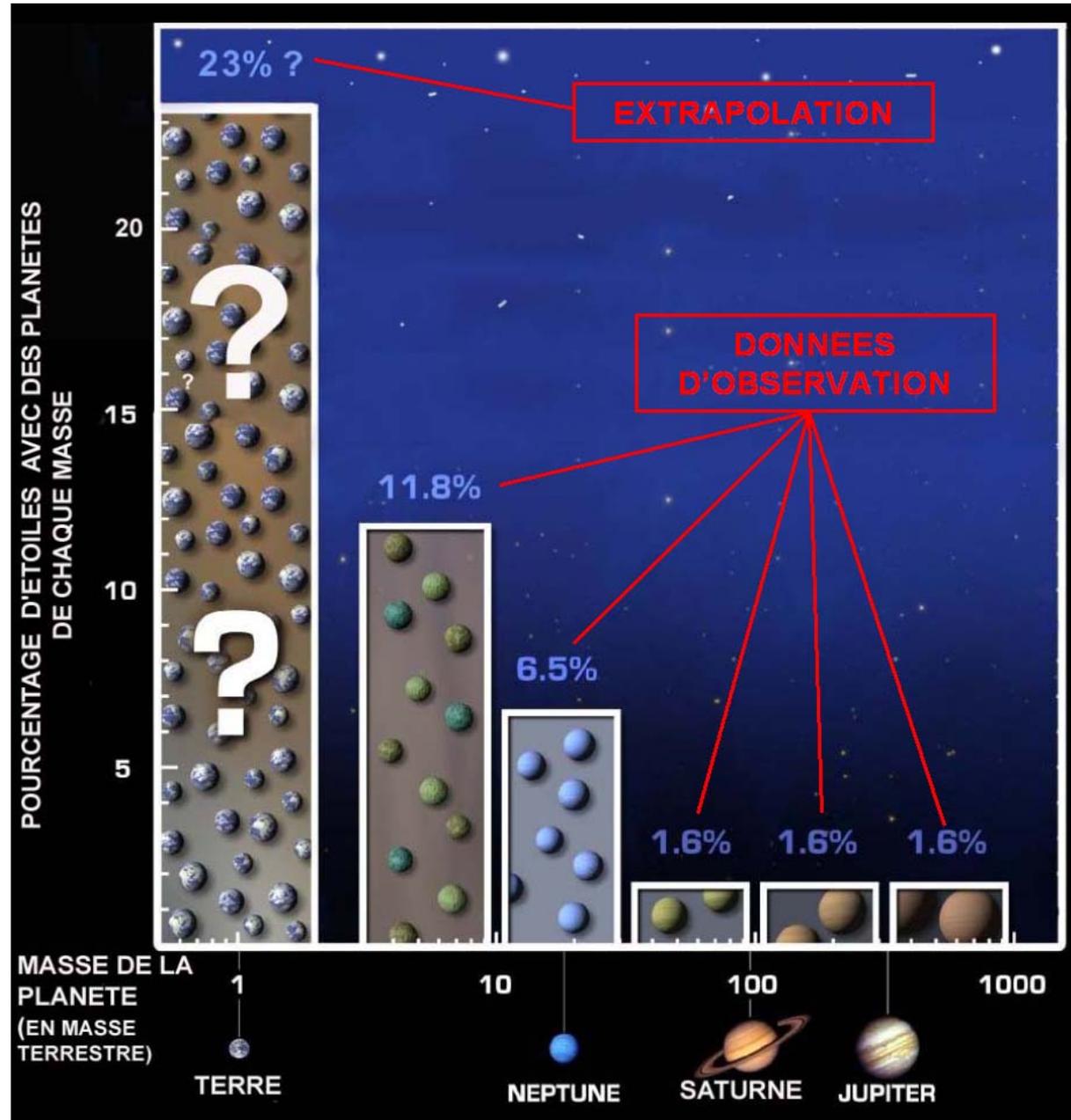
...

# EXOPLANÈTES : Statistiques

25% des étoiles ont 1 planète (au moins).

On peut extrapoler :  
il y a au moins 46 milliards de planètes de type terrestre dans notre Galaxie !

NB : Variété extraordinaire, avec planètes de type inconnu (Jupiters chauds, super terres) → du travail pour les théoriciens !



# Introduction

- Existence, Observation directe
- Équation de Drake

## I Méthodes de détection indirectes

- Vitesse radiale (vélocimétrie)
- Transit (photométrie)

## II Propriétés, Habitabilité

- Classes d'exoplanètes
- Conditions d'habitabilité, zone habitable.

## Conclusion : le paradoxe de Fermi



# CHRONOLOGIE de la VIE

14 milliards d'années : Big Bang, naissance de l'Univers.

**4,5 milliards d'années : Formation de la Terre.**

3,8 milliards d'années : Première forme de vie (unicellulaire).

3,0 milliards d'années : Photosynthèse.

1,2 milliards d'années : Première forme de vie pluri-cellulaire.

0,6 milliards d'années : Explosion cambrienne.

**480 millions d'années : Premières plantes terrestres.**

220 millions d'années : Premiers mammifères.

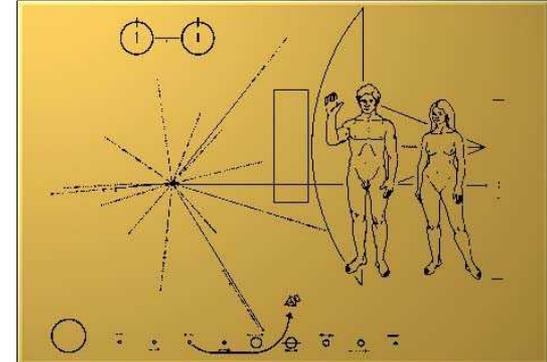
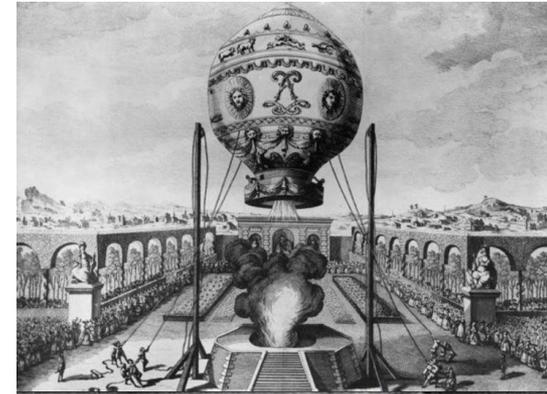
**65 millions d'années : Fin des dinosaures.**

**3 millions d'années : Australopithèques**

**400 000 ans : maîtrise du feu.**

# CHRONOLOGIE des TRANSPORTS

- 4500 : Domestication du cheval.
- 1520 : Magellan fait le tour du monde.
- 1782 : Montgolfière.
- 1906 : Premier vol en avion.
- 1947 : Franchissement du mur du son.
- 1961 : Gagarine dans l'espace.
- 1969 : L'homme sur la Lune.
- 1975 : *Viking* sur Mars.
- 2004 : *Cassini* en orbite autour de Saturne.
- 2012 : *Voyager* quitte le système solaire.
- 10 000 : L'homme conquiert la Galaxie ???



# PARADOXE de FERMI

A l'échelle de l'Univers, nous aurons conquis la Galaxie en un claquement de doigts, si nous continuons notre développement.

Pourquoi, parmi les 46 milliards de planètes terrestres n'y en aurait-il pas une qui a 10000 ans d'avance sur nous ?  
Formée il y a 4500,01 millions d'années ?

Où sont-ils ?

Y a-t-il une faille dans le raisonnement ?



# PARADOXE de FERMI

à mon humble avis :

Un développement exponentiel n'est pas possible indéfiniment.

1) limites physiques :

- vitesse de la lumière indépassable
- ressources limitées



# PARADOXE de FERMI

à mon humble avis :

Un développement exponentiel n'est pas possible indéfiniment.

2) limites sociétales :

Le facteur L de Drake n'est peut-être pas très grand...

- Guerre froide...

- Nouvelle étude (financée par la NASA) : HANDY.

Notre civilisation va bientôt disparaître :

inégalités, épuisement des ressources, changement climatique

*« Si ces scénarios paraissent difficiles à éviter, les scientifiques mettent en avant la nécessité urgente de "réduire les inégalités économiques afin d'assurer une distribution plus juste des ressources, et de réduire considérablement la consommation de ressources en s'appuyant sur des ressources renouvelables moins intensives et sur une croissance moindre de la population." »*

**En ayant la tête dans les étoiles,  
on retombe sur Terre...**

**On a beau connaître  
1000 exo-planètes  
on se rend compte  
qu'on ferait mieux  
de protéger la  
notre, et de tout  
faire pour bien y  
vivre ensemble...**

