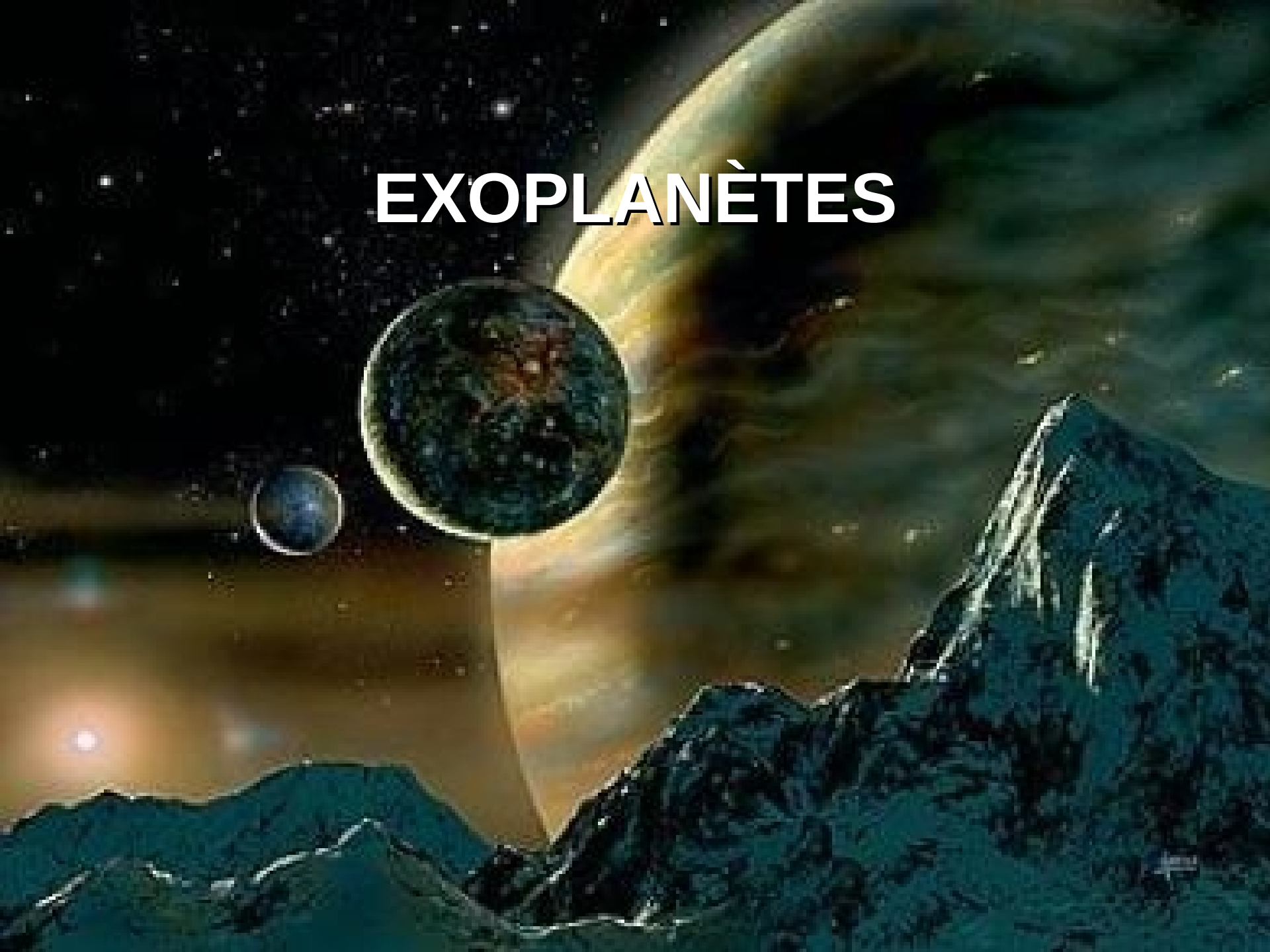

EXOPLANÈTES

EXOPLANÈTES

INTRODUCTION

Existence
Équation de Drake

I Méthodes de détection indirectes

Vitesse radiale (vélocimétrie)
Transit (photométrie)

II Propriétés et statistiques

Masse, demi-grand axe, période, excentricité, rayon, métallicité de l'étoile hôte, densité, spectre...

Synthèse de Population de Planètes

EXOPLANÈTES

La naissance d'une étoile donne lieu à la formation d'un disque protoplanétaire,

dans lequel des planetes peuvent se former.

On s'attend donc à ce que de nombreuses étoiles aient des planetes.

Pourtant, j'ai appris à l'école primaire qu'il y avait 8 (9) planetes dans le Systeme Solaire, et que c'était tout...

EXOPLANÈTES

« 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)

EXOPLANÈTES

« 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)

EXOPLANÈTES

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



EXOPLANÈTES

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

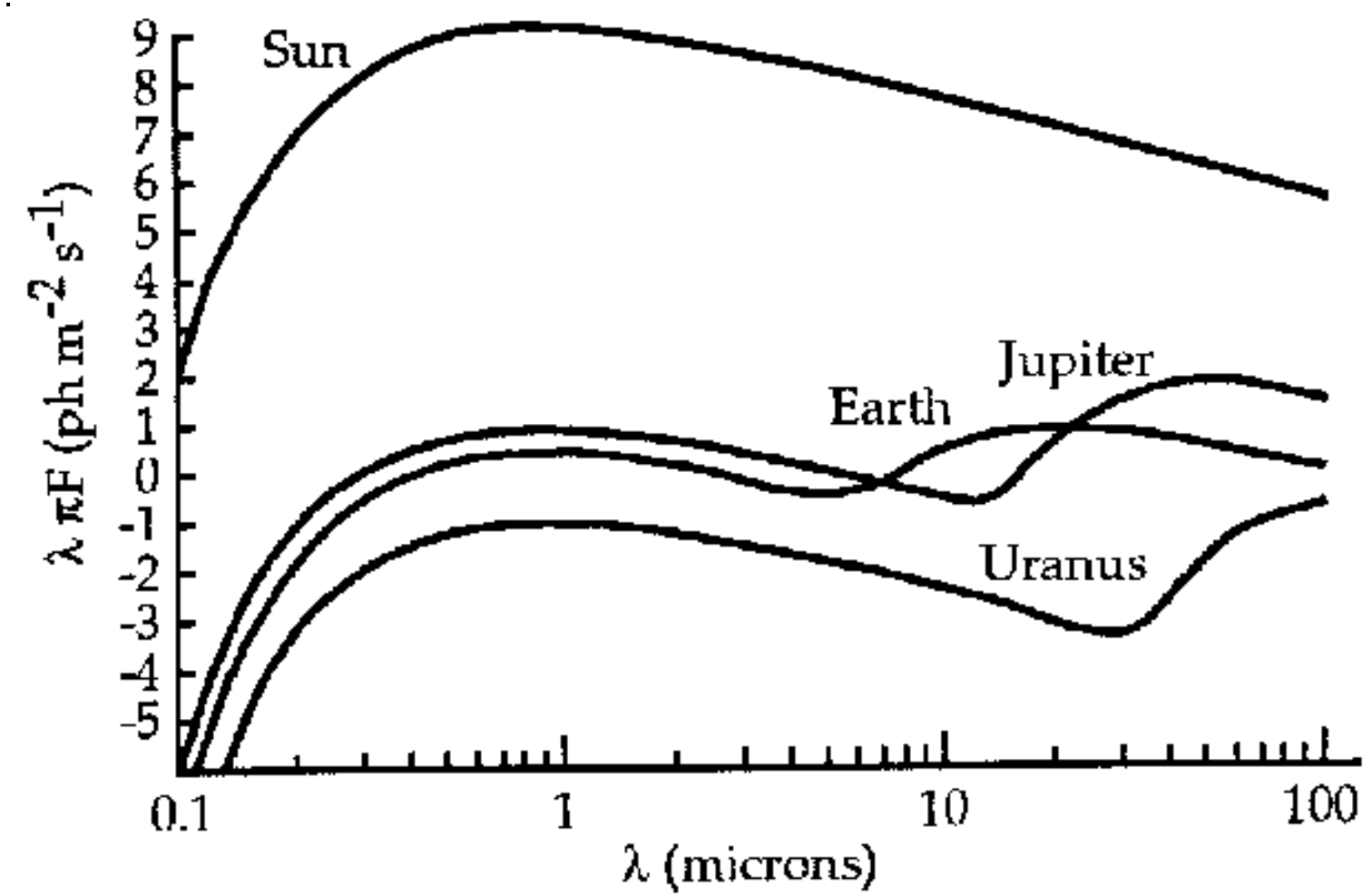


EXOPLANÈTES

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



EXOPLANÈTES



EXOPLANÈTES

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

Et le tout très loin, comme un ver luisant à côté d'un phare... à New York !

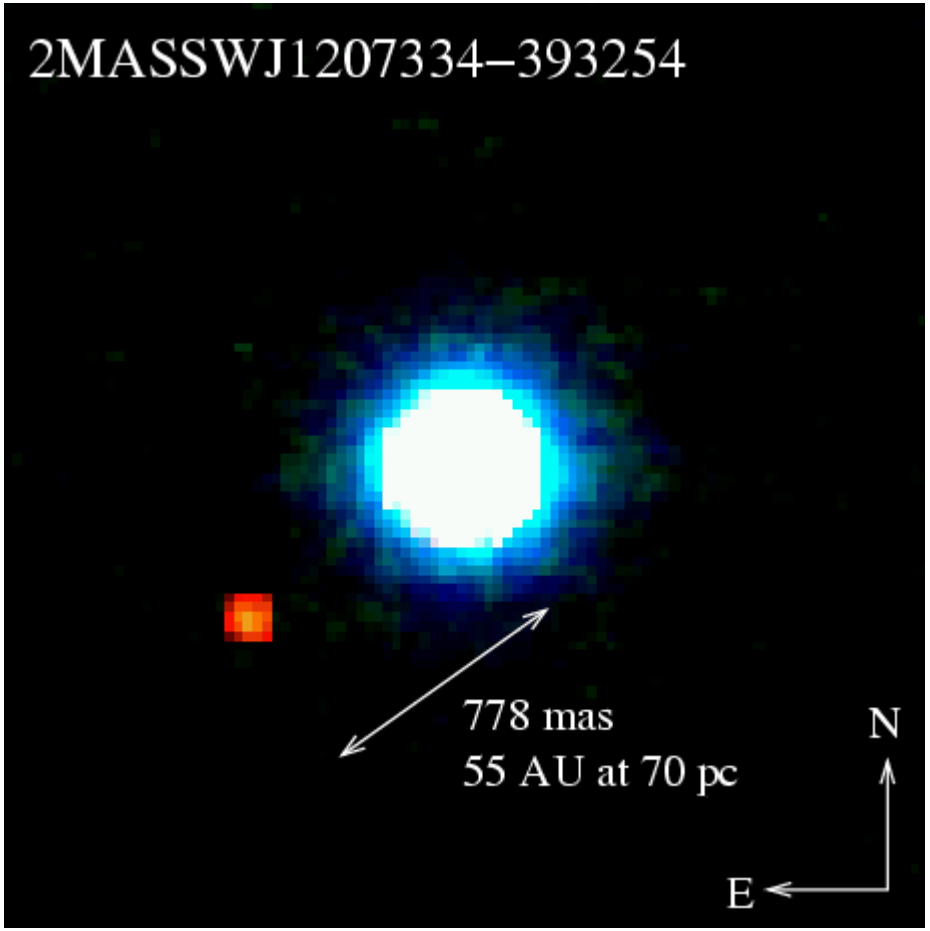


EXOPLANÈTES

Parfois, ça marche !

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

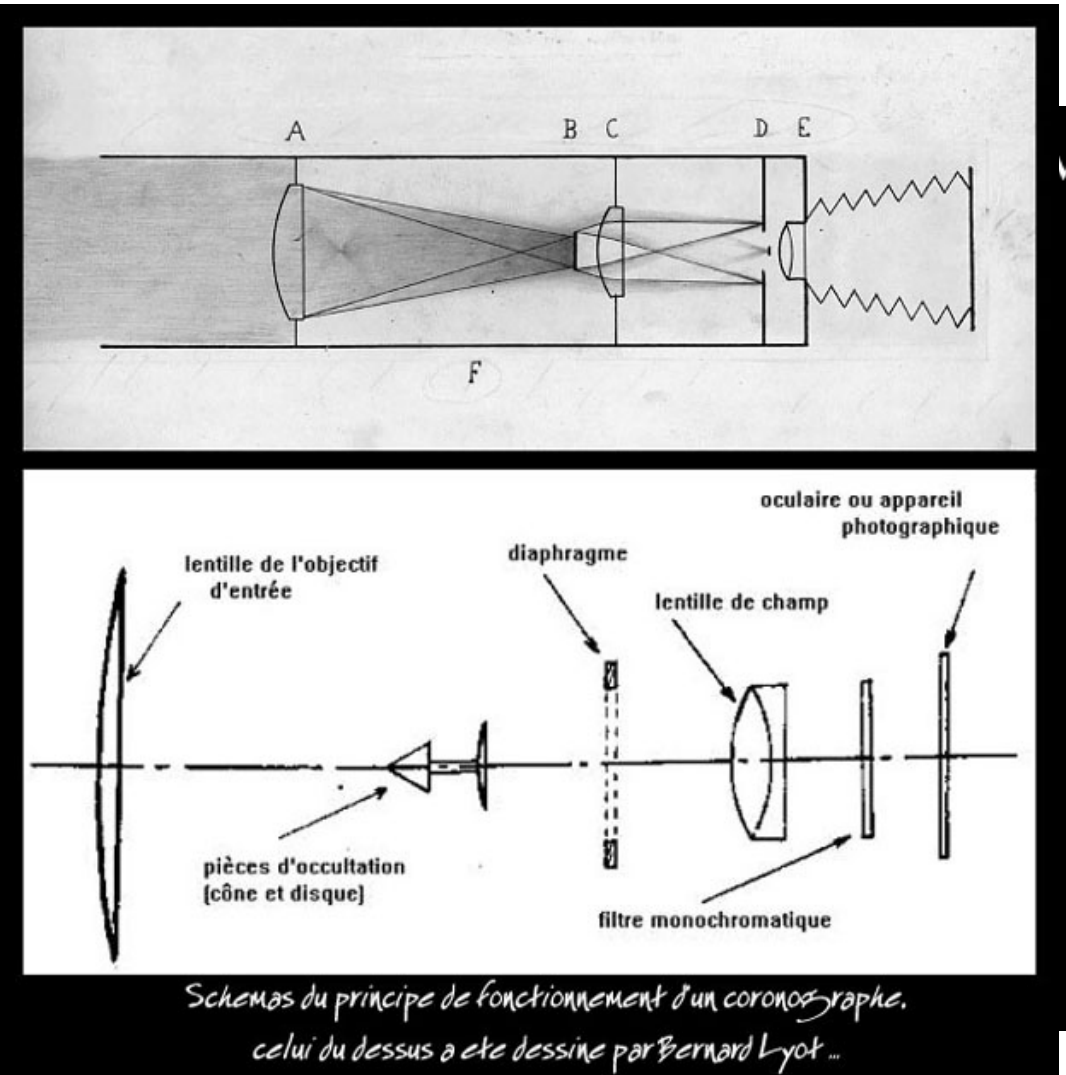
Première image d'une exoplanète :
Chauvin et al. (2004)



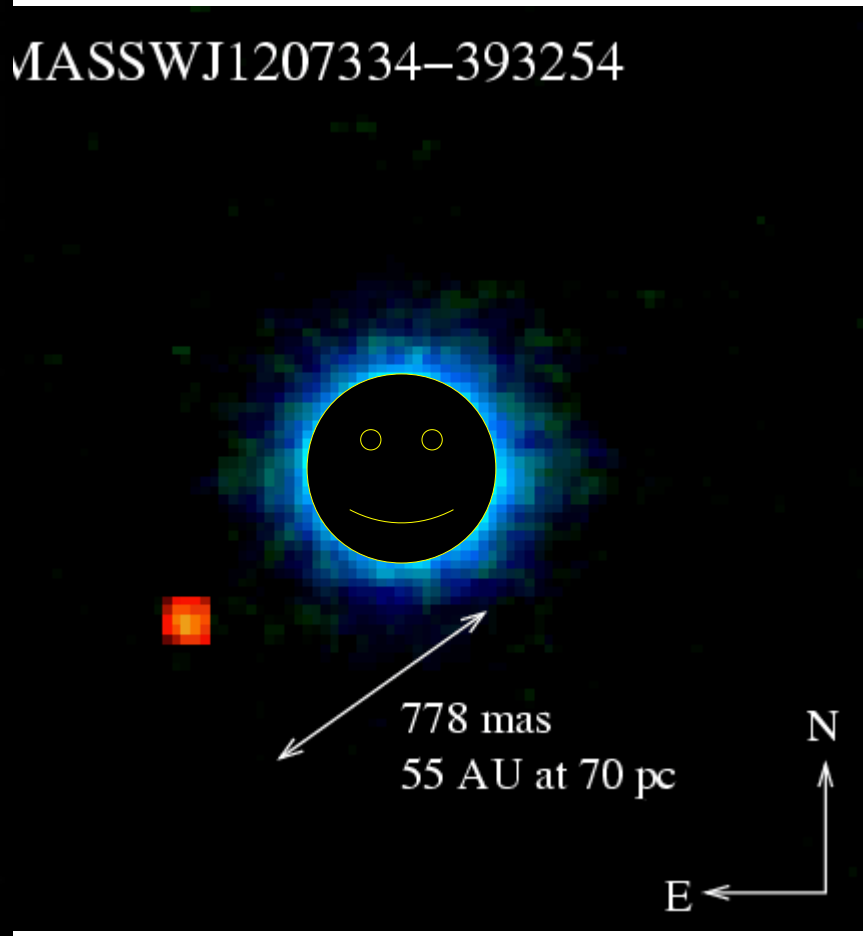
Plutôt une naine brune double...

EXOPLANÈTES

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

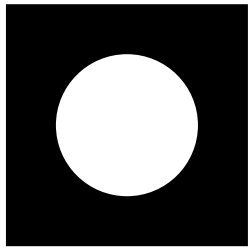


Schemas du principe de fonctionnement d'un coronographe. celui du dessus a ete dessine par Bernard Lyot ...



EXOPLANÈTES

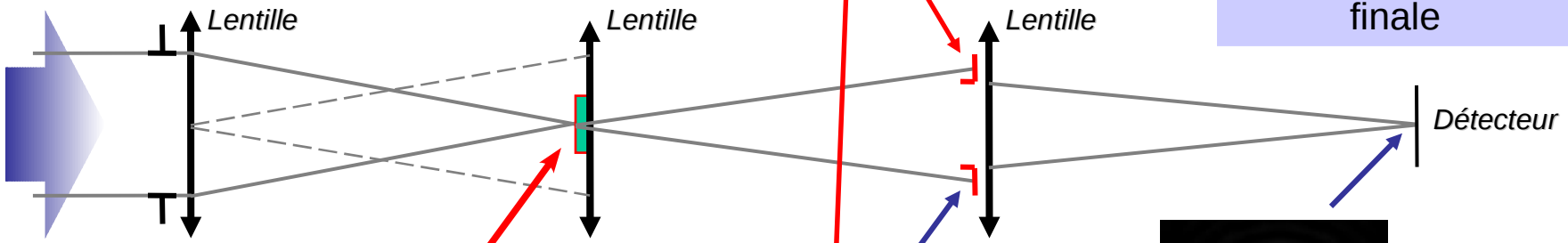
Si besoin, on cache l'étoile avec un **coronographe**.



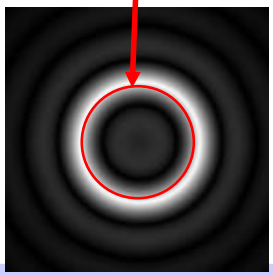
Pupille d'entrée

Diaphragme de Lyot

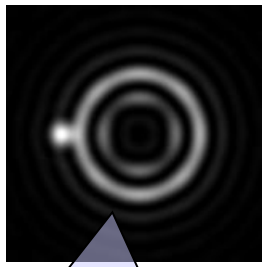
Image coronographique finale

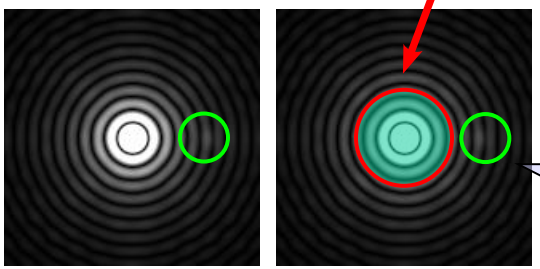


cache



« Pupille coronographique »

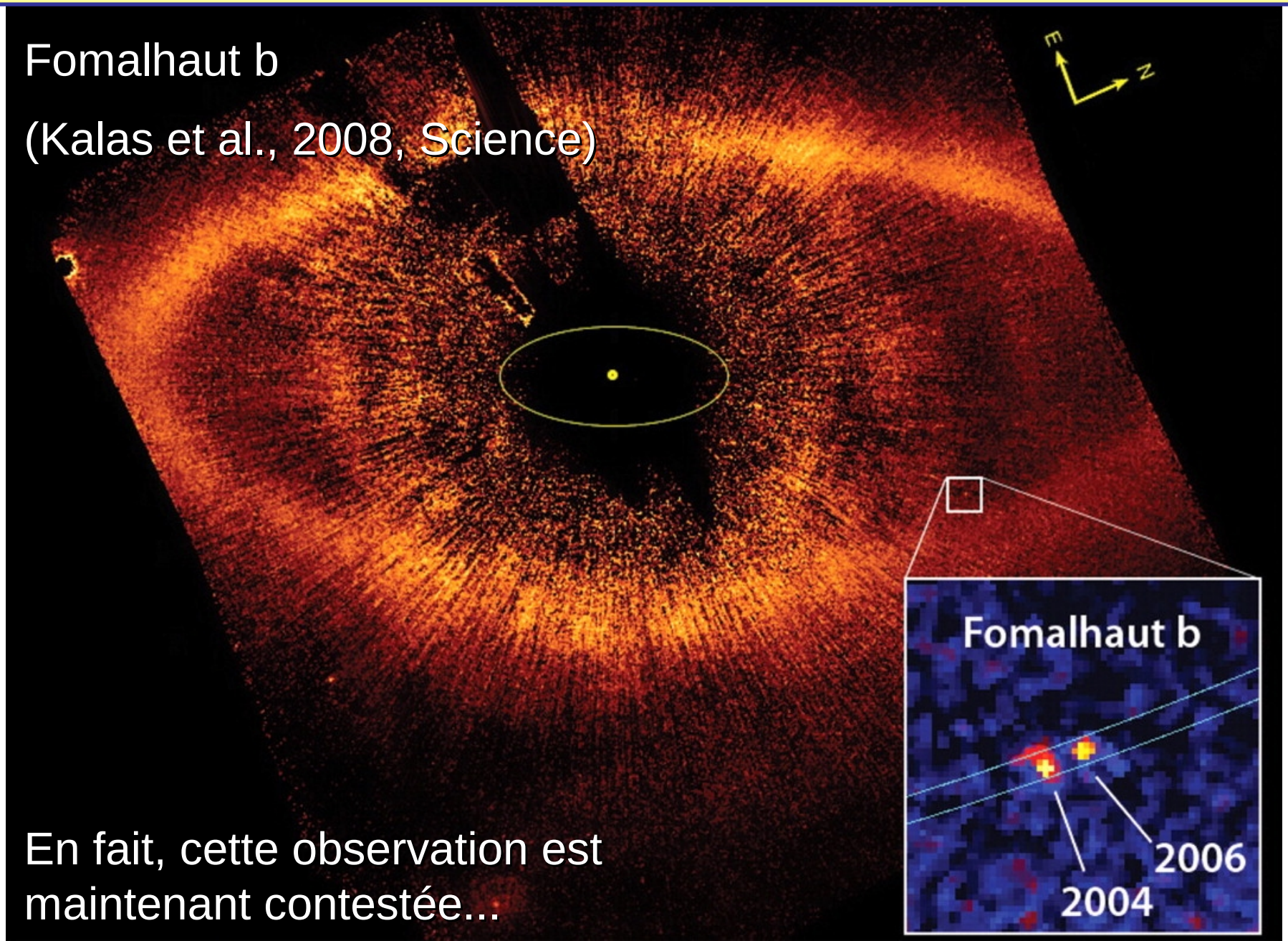




Là il y a un objet, mais il est trop faible pour être détecté…

On a très fortement atténué l'intensité lumineuse de l'étoile sur l'axe… On parle du pouvoir d'extinction du coronographe

EXOPLANÈTES

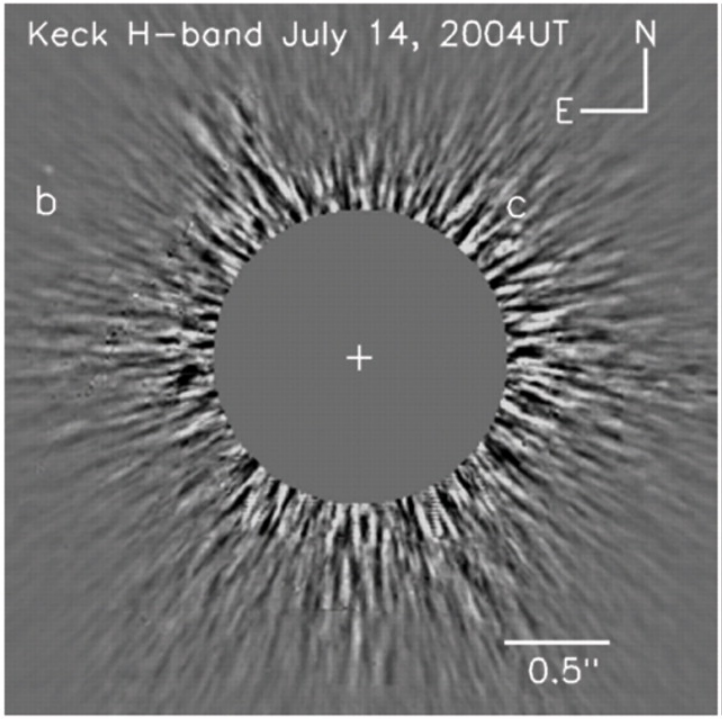


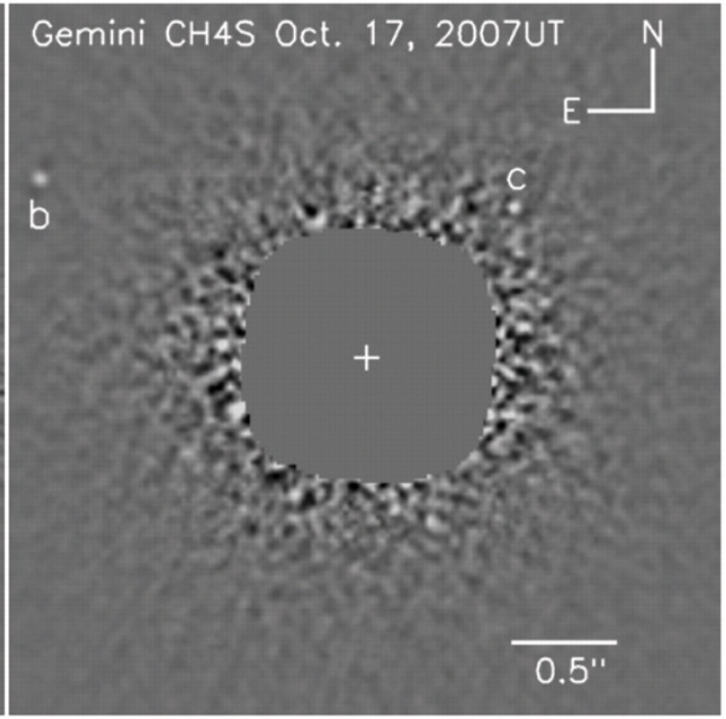
HR8799 :

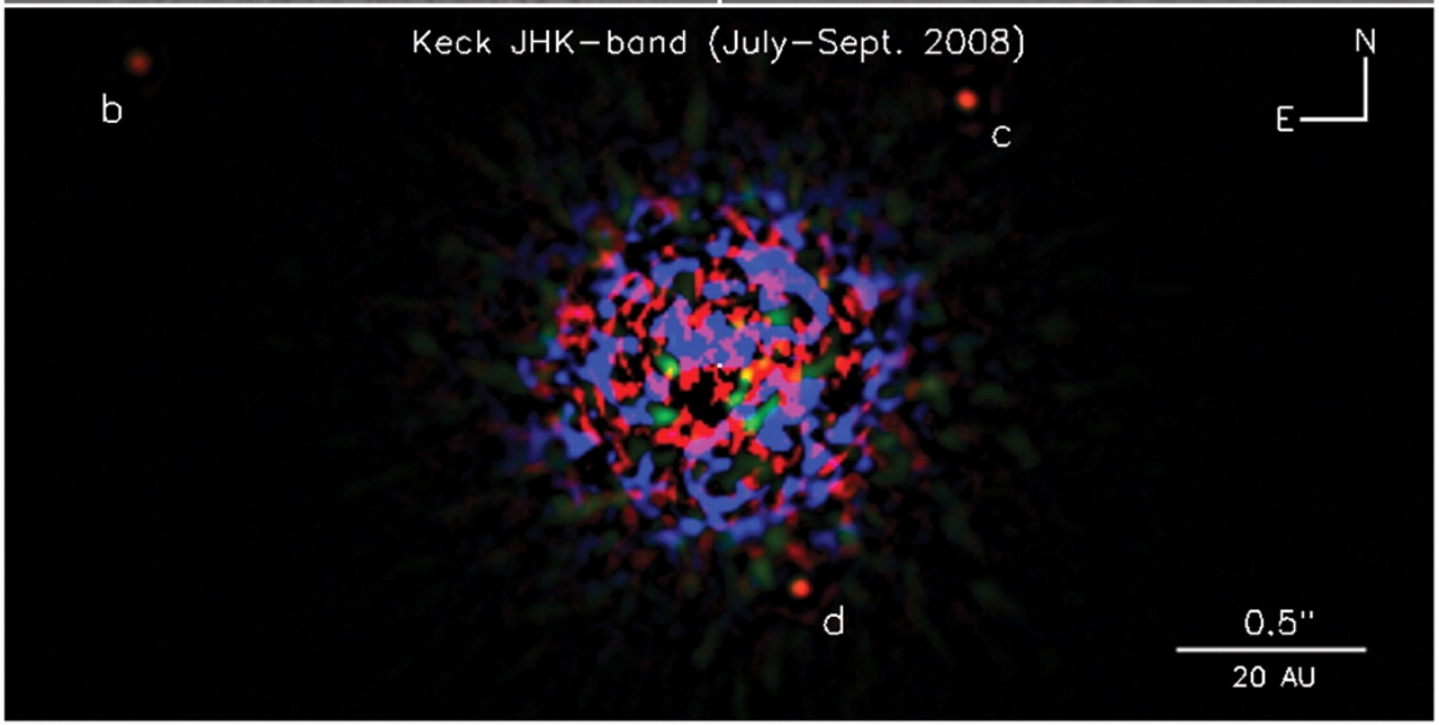
3 planètes géantes à 24, 38, et 68 UA de l'étoile.

(Marois et al., 2008, Science)

+ 1 quatrième confirmée fin novembre 2010







EXOPLANÈTES

Il y en a ! Giordano Bruno avait raison.

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

1) héliocentrisme (Copernic, 1543)

2) univers îles, galaxies différentes (Hubble, 1925)

3) exoplanètes (Mayor & Queloz, 1995)

4) vie extraterrestre ?

EXOPLANÈTES

Formule de Drake (1971)

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

$$N = R\ f\ L$$

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)

EXOPLANÈTES

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.

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

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

f_{vie}, f_{intel} = facteurs biologiques.

f_{com}, L = facteurs sociologiques...

INTRODUCTION

Existence
Équation de Drake

I Méthodes de détection indirectes

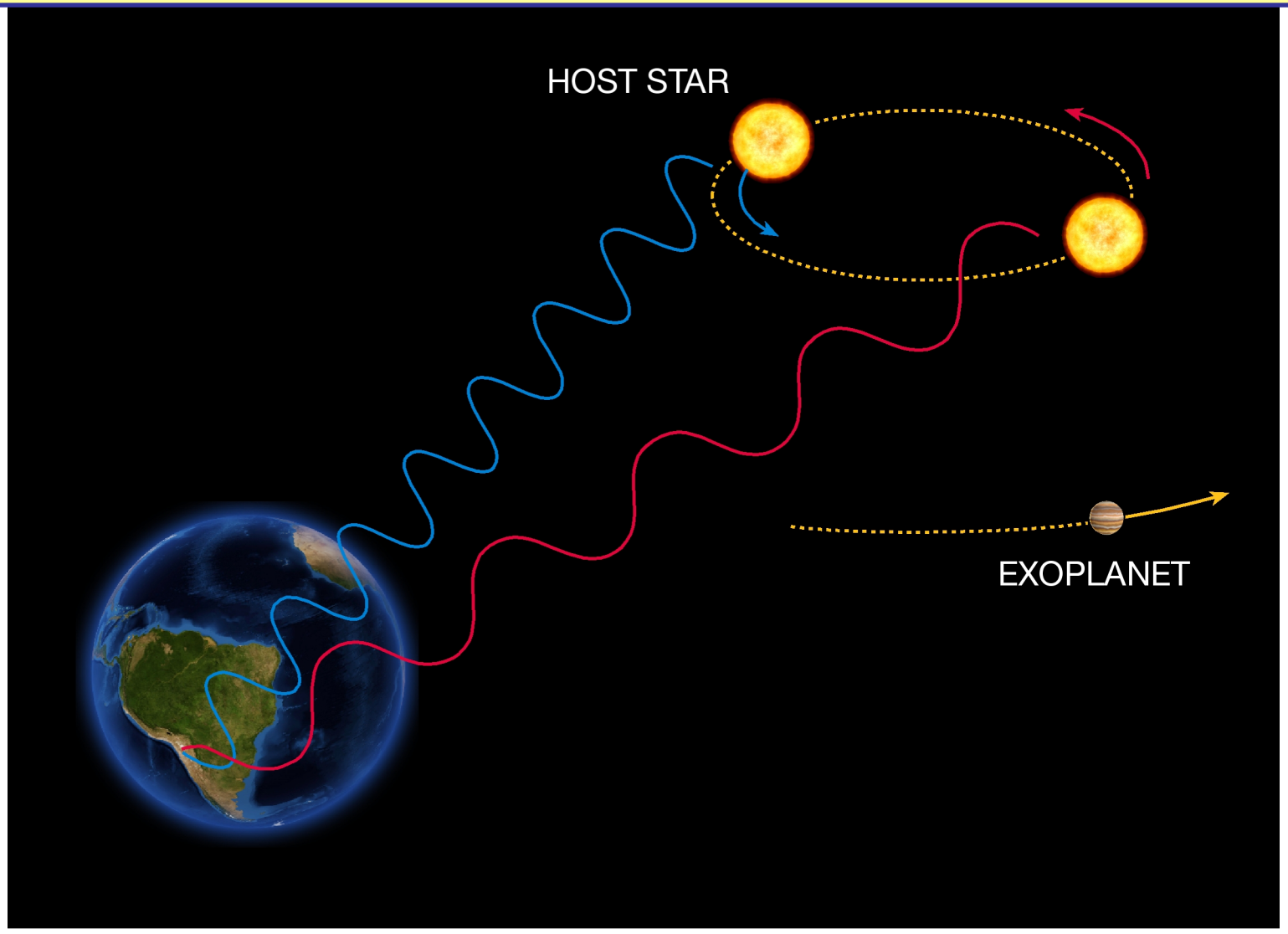
Vitesse radiale (vélocimétrie)
Transit (photométrie)

II Propriétés et statistiques

Masse, demi-grand axe, période, excentricité, rayon, métallicité de l'étoile hôte, densité, spectre...

Synthèse de Population de Planètes

EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie



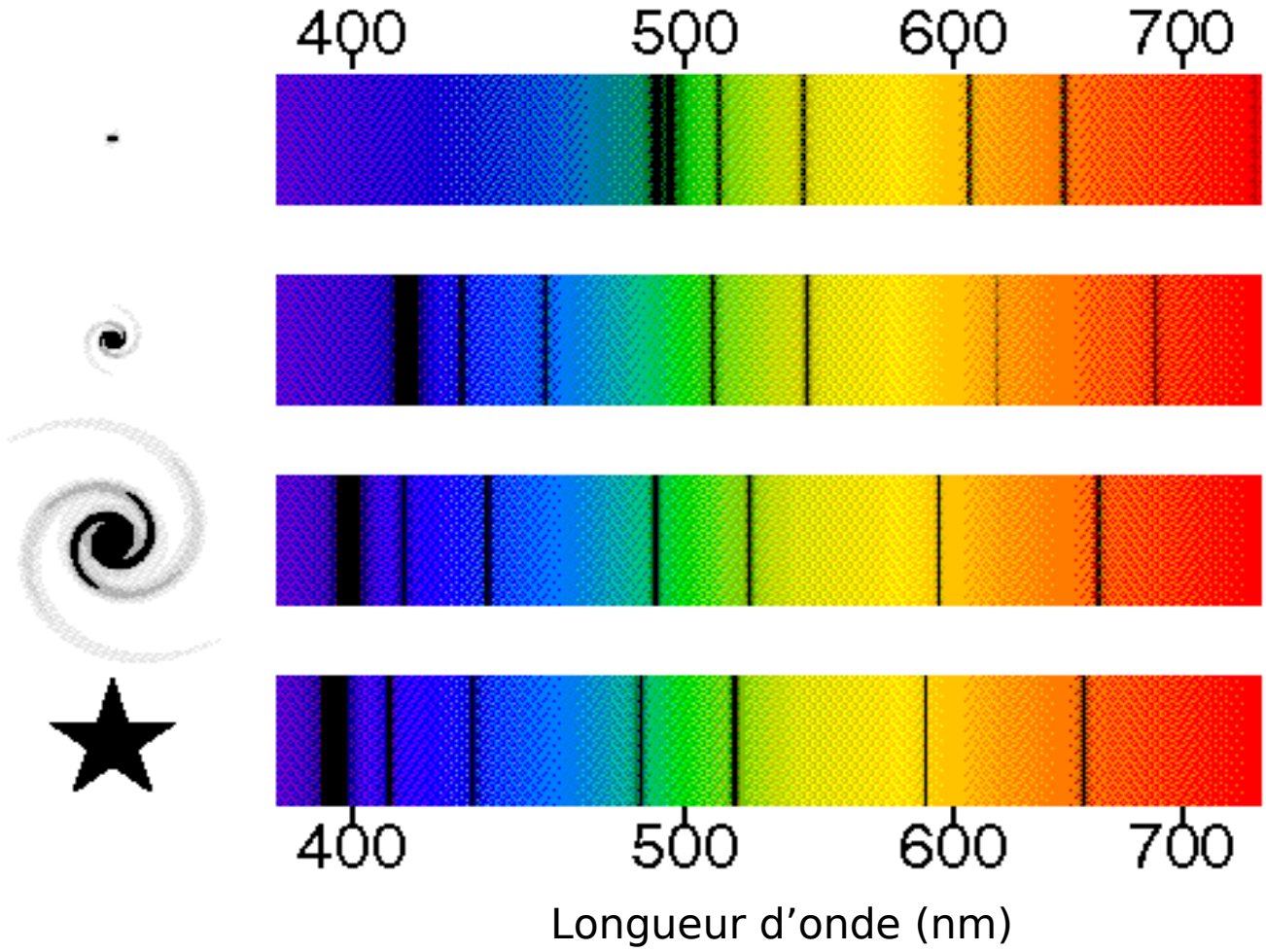
The Radial Velocity Method

ESO Press Photo 22e/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.

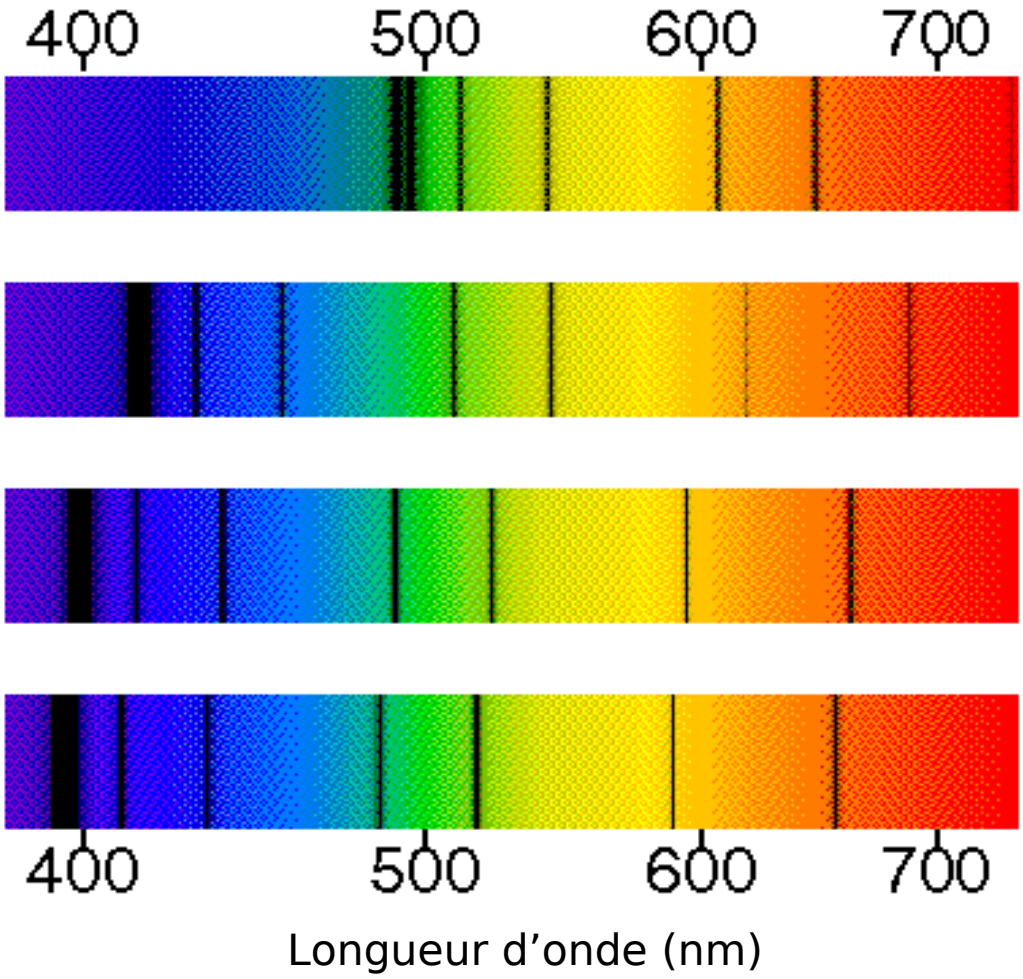
EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

Effet Doppler :



EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

Effet Doppler :



Digression :

Loi de Hubble (1929)

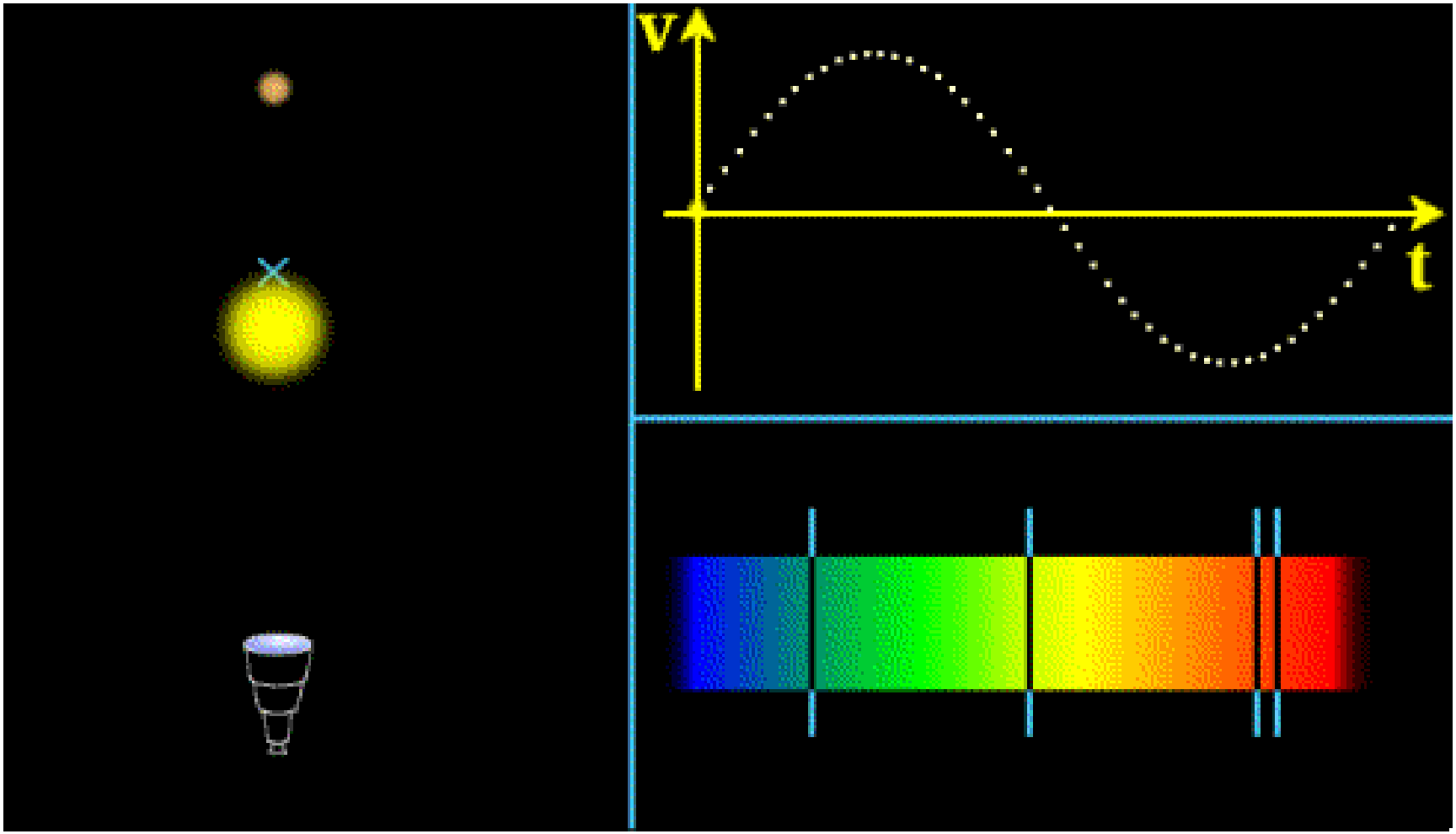
Les objets les plus lointains s'éloignent le plus vite :

$v = H_0 * d$

H_0 : constante de Hubble

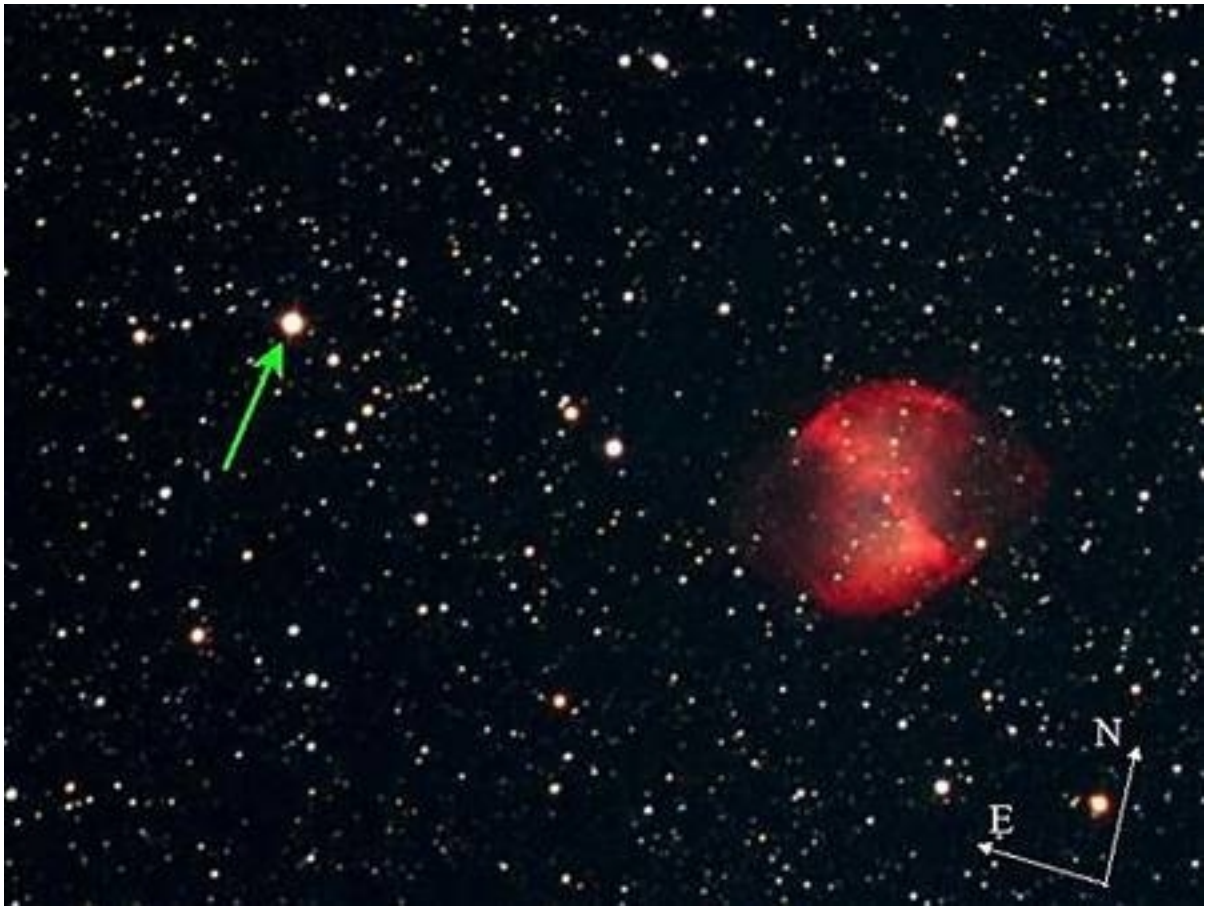
L'Univers est donc en expension, depuis un temps prop. à $1/H_0$.

EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie



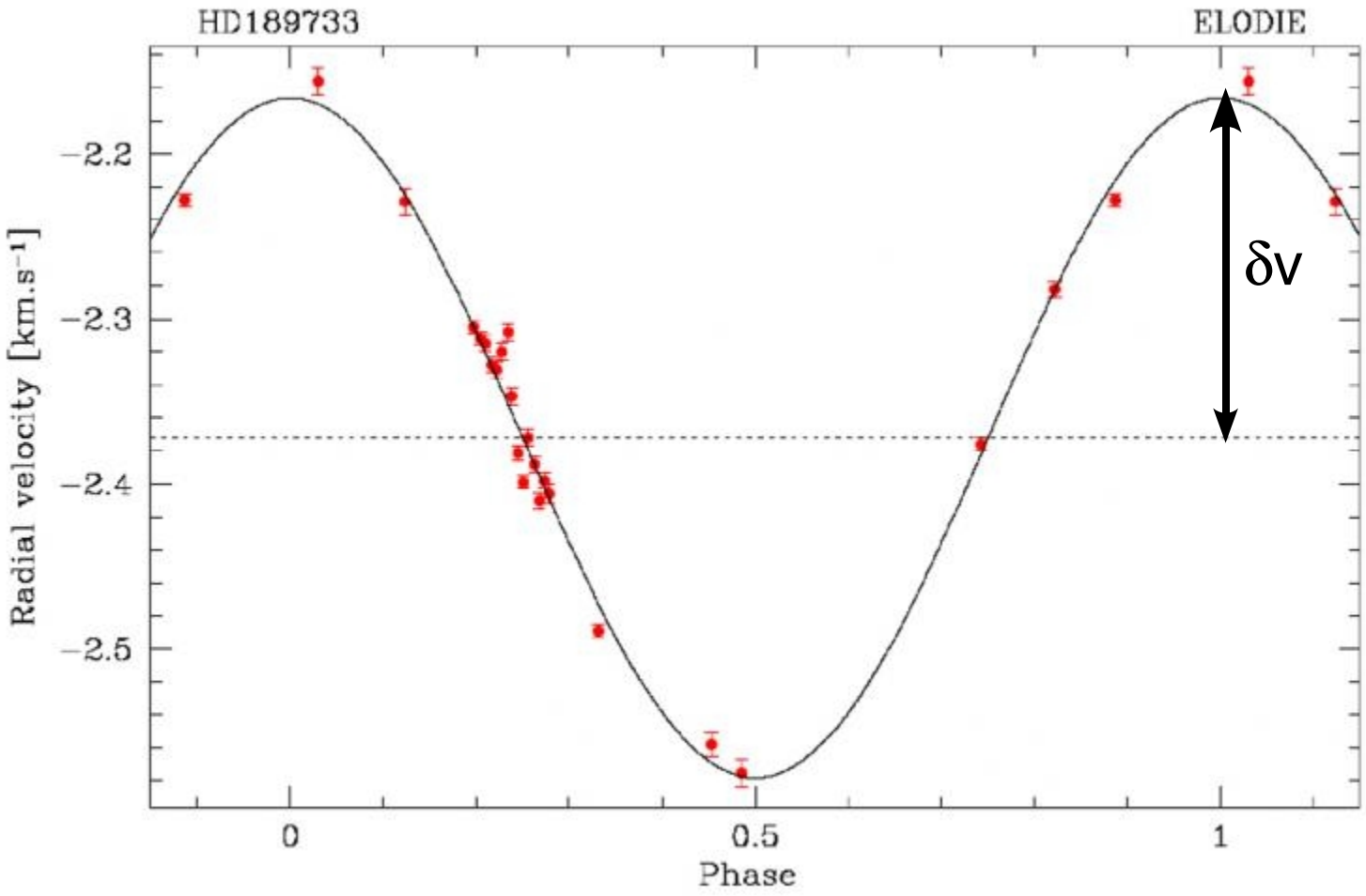
EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

Exemple : L'étoile HD189733



EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

Exemple : HD189733



EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

Le **demi grand axe** a est donné par la période :

$T^2 = (4\pi^2/GM_*)a^3$

La **masse $q=M_p/M_*$** est donnée par l'amplitude δv :

La vitesse de la planète est : $v_p = a\Omega = (GM_*/a)^{1/2}$

Donc la vitesse de l'étoile autour du centre de gravité est, par conservation de la quantité de mouvement : $v_* = - q\, v_p$

D'où $q = \delta v\, (a/GM_*)^{1/2}$.

<u>Application numérique :</u> (rappel: $M_{Soleil}=2.10^{30}$ kg)

Pour Jupiter, $q=10^{-3}$, a=5,2 UA, $\delta v = 13$ m.s^{-1}.

Pour la Terre, $q=3.10^{-6}$, a=1UA, $\delta v = 0,09$ m.s^{-1}.

EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

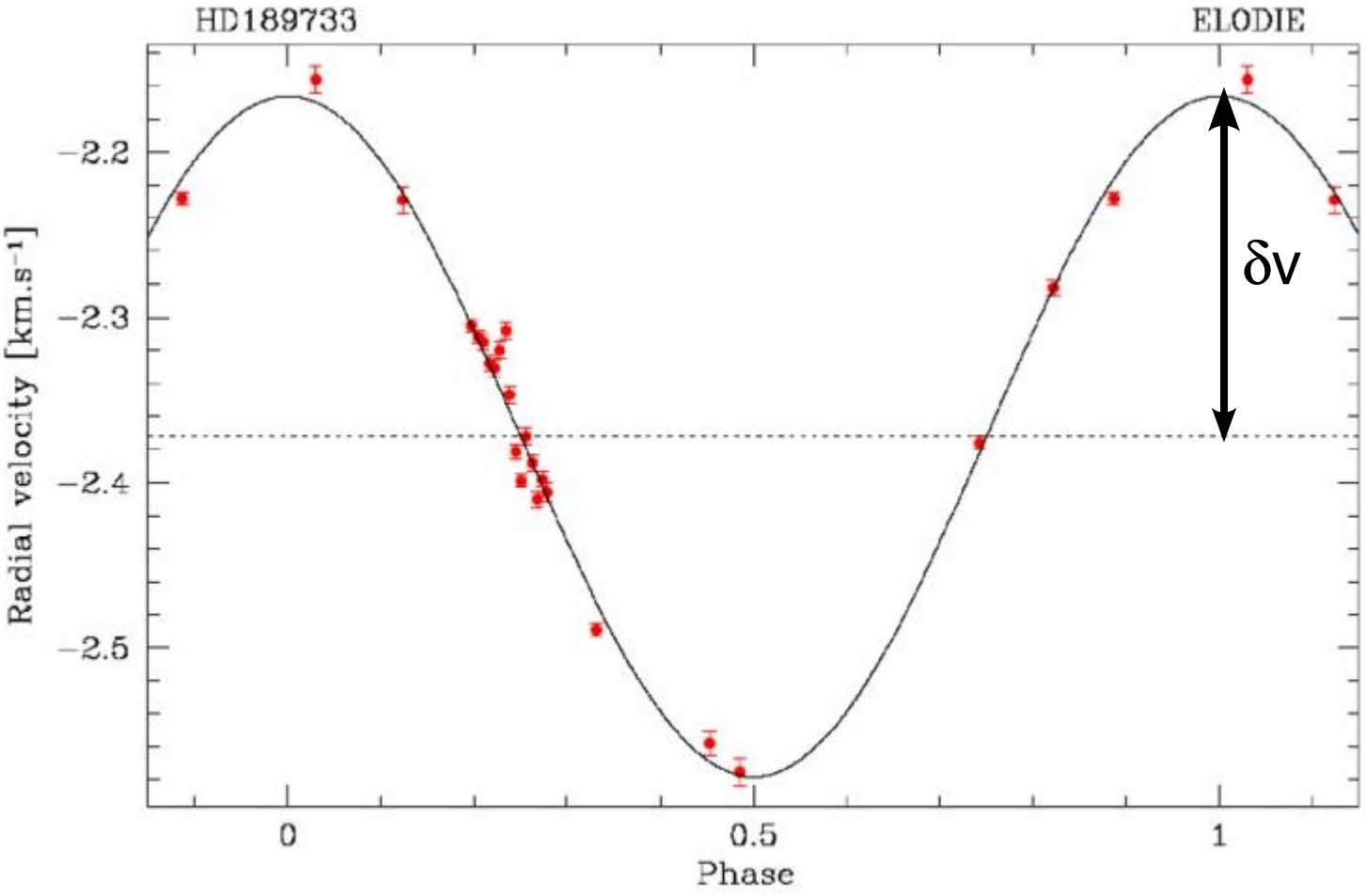
HD189733b :

On donne

T=2,218 jours,

M_*=1,6x10^{30} kg.

Trouvez q, M_p.



EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

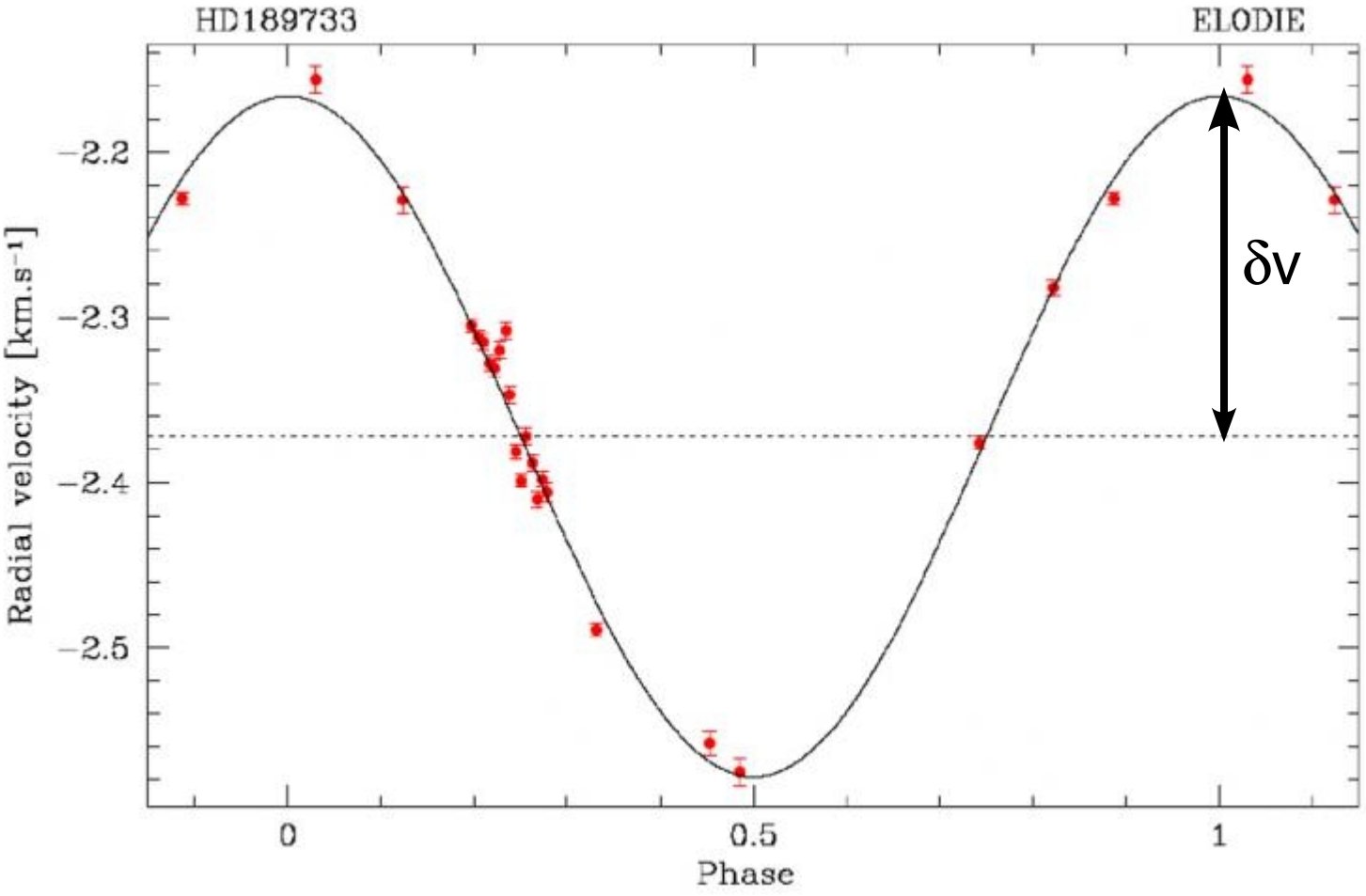
HD189733b :

On donne

T=2,218 jours,

M_*=1,6x10^{30} kg.

Trouvez q, M_p.



Solution:

a = 4,64x10^9 m = 0.031 AU . δv=~200 m.s^{-1}.

Donc q=1,3x10^{-3}, d'où M_p=1,1 M_{Jup}.

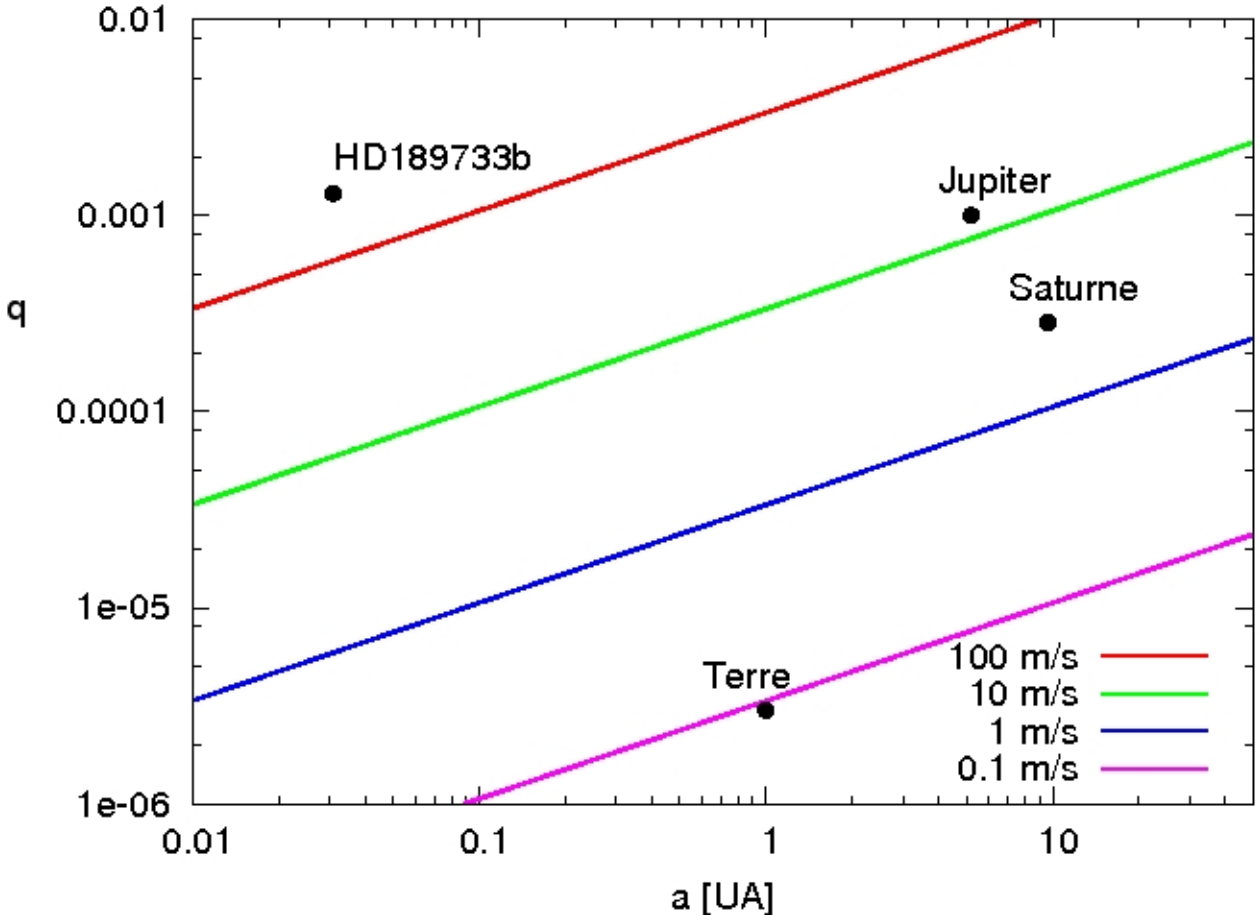
EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

On mesure actuellement des différences de vitesse de l'ordre de 1 m/s ! C'est une différence en λ inférieure à la largeur de la raie. On rappelle que $\delta\lambda = \lambda_0 \, v/c$.

<u>Détectabilité :</u>

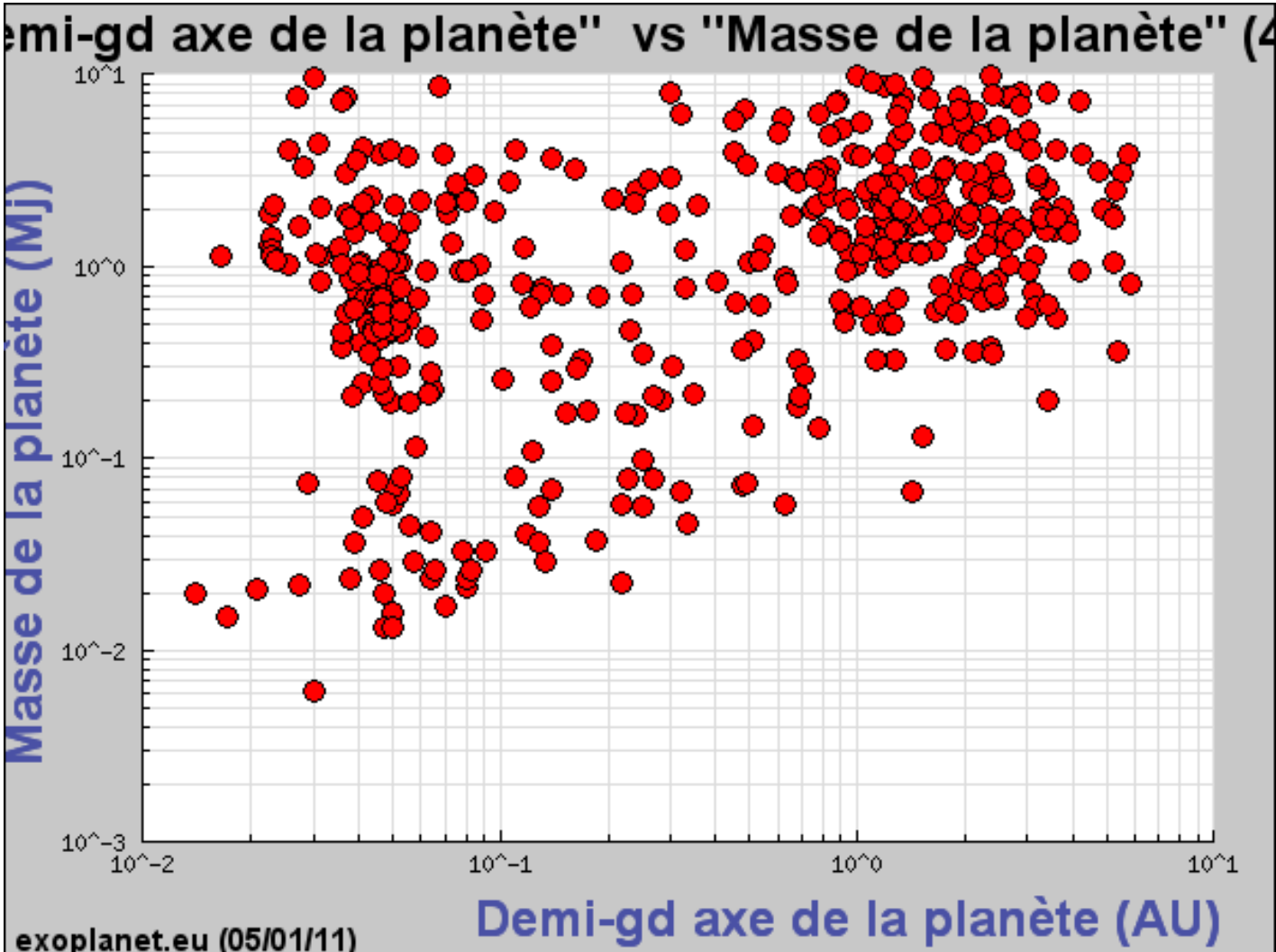
$\delta v = q \, (GM_*/a)^{1/2}$.

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



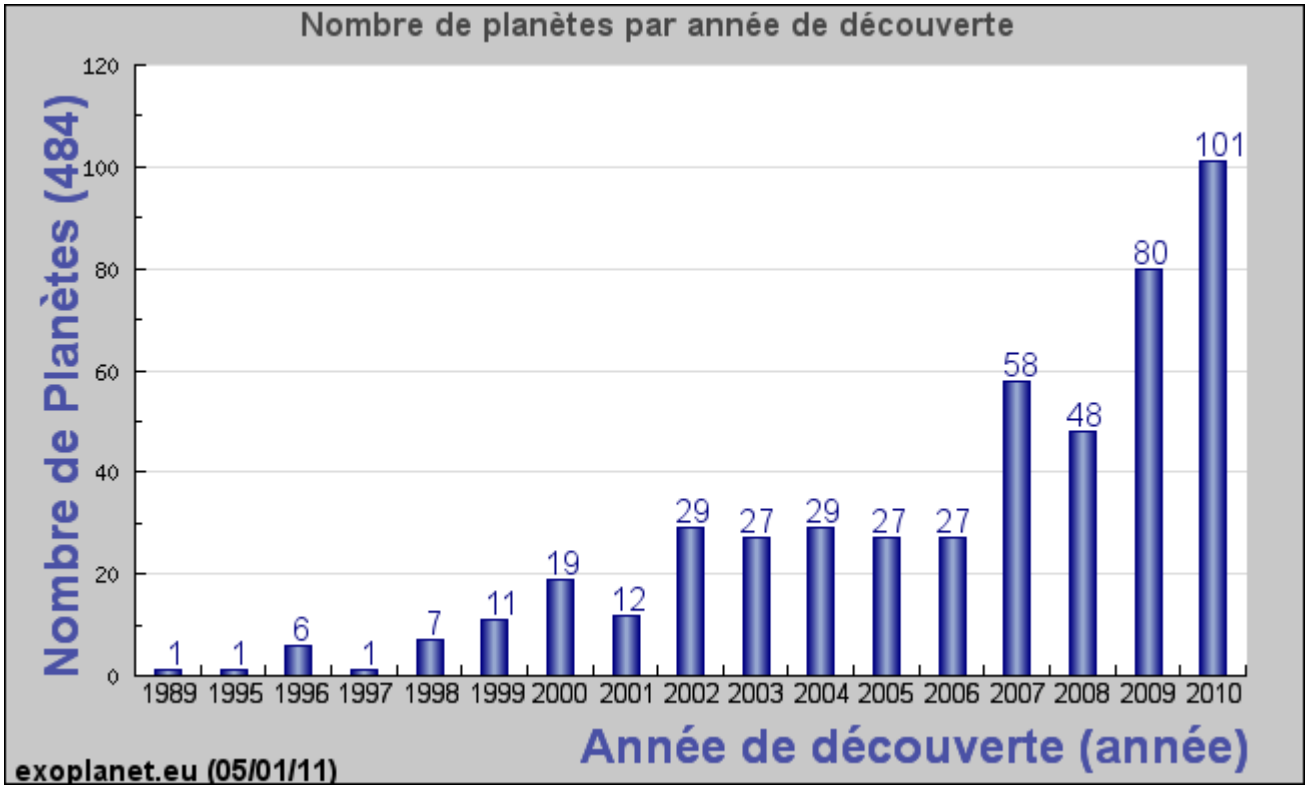
EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

Détections : 484 planètes au 5 janvier 2011.



EXOPLANÈTES : I a) Vélocimétrie

Détections : 484 planètes au 5 janvier 2011.



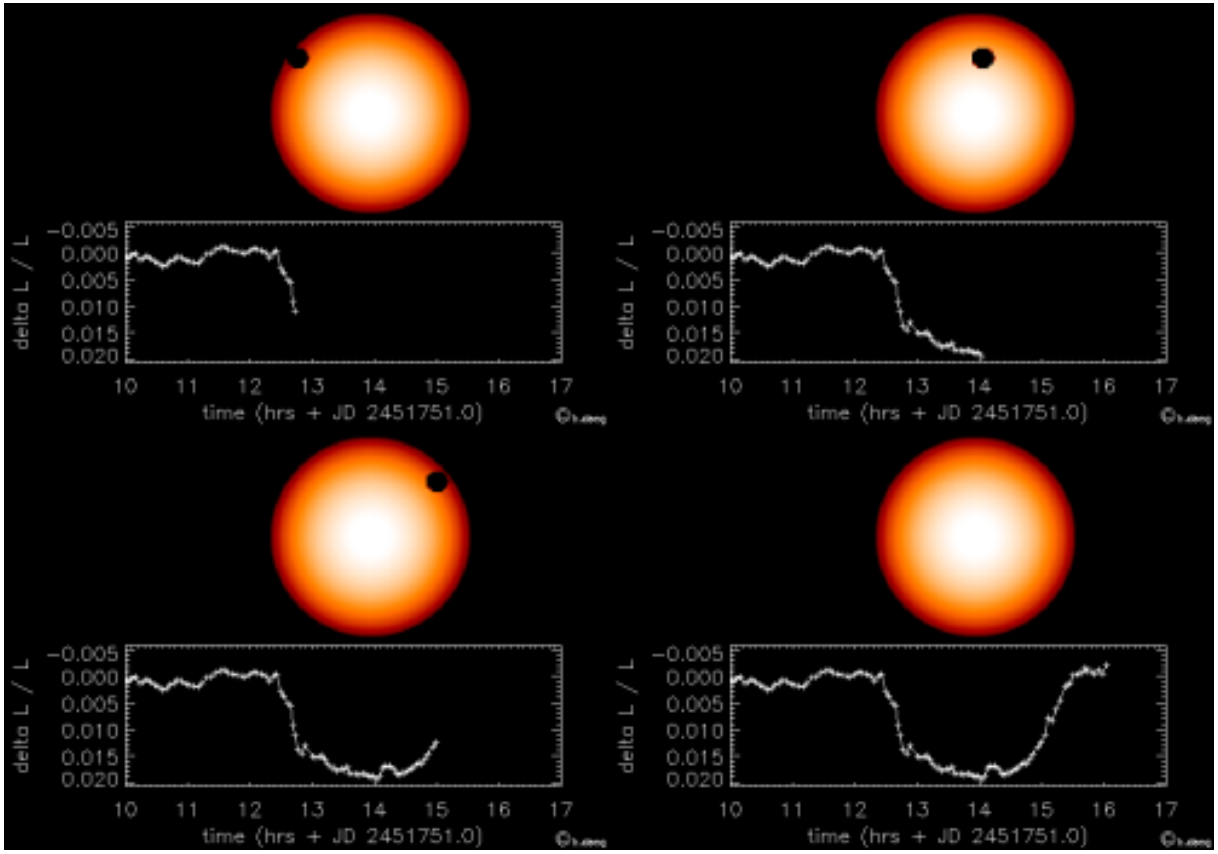
EXOPLANÈTES : I b) Transit



EXOPLANÈTES : I b) Transit

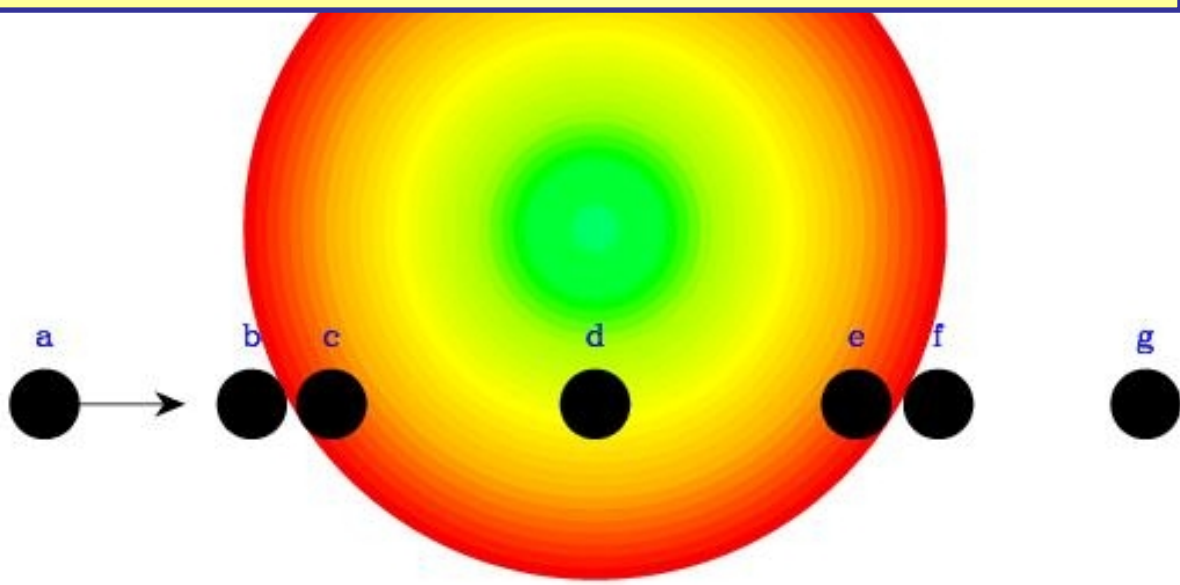
Comme Vénus devant le soleil en 2004, parfois, une exoplanète passe devant son étoile, c'est un **transit**.

On observe alors une baisse de luminosité de l'étoile :

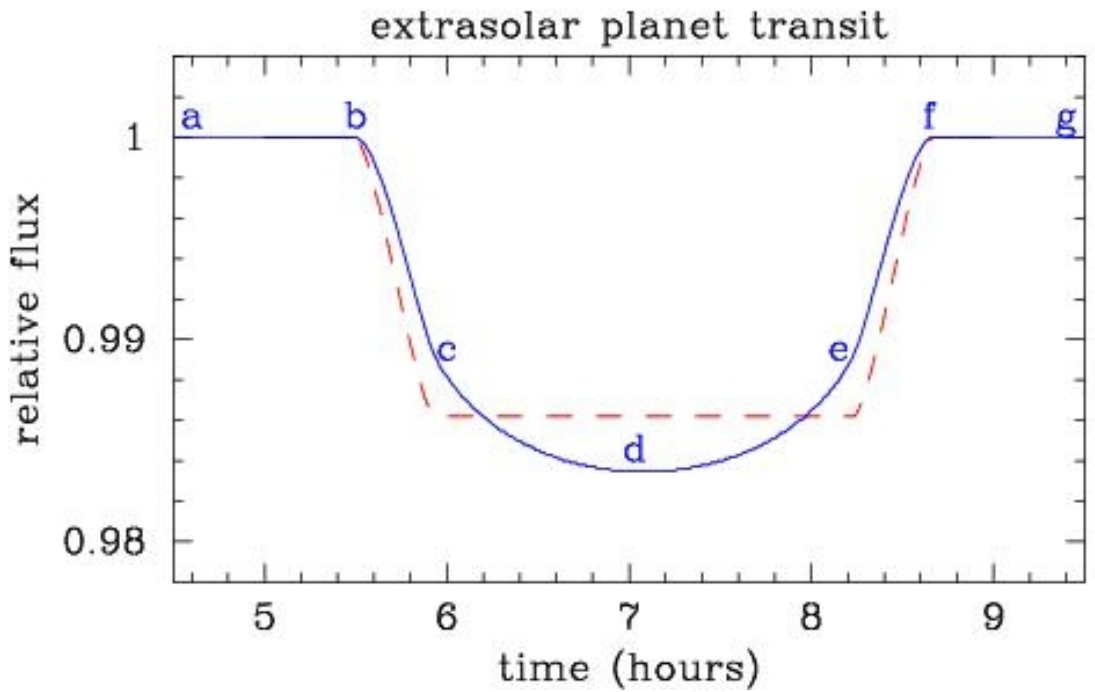


EXOPLANÈTES : I b) Transit

Assombrissement centre-bord : le fond du transit n'est pas plat.

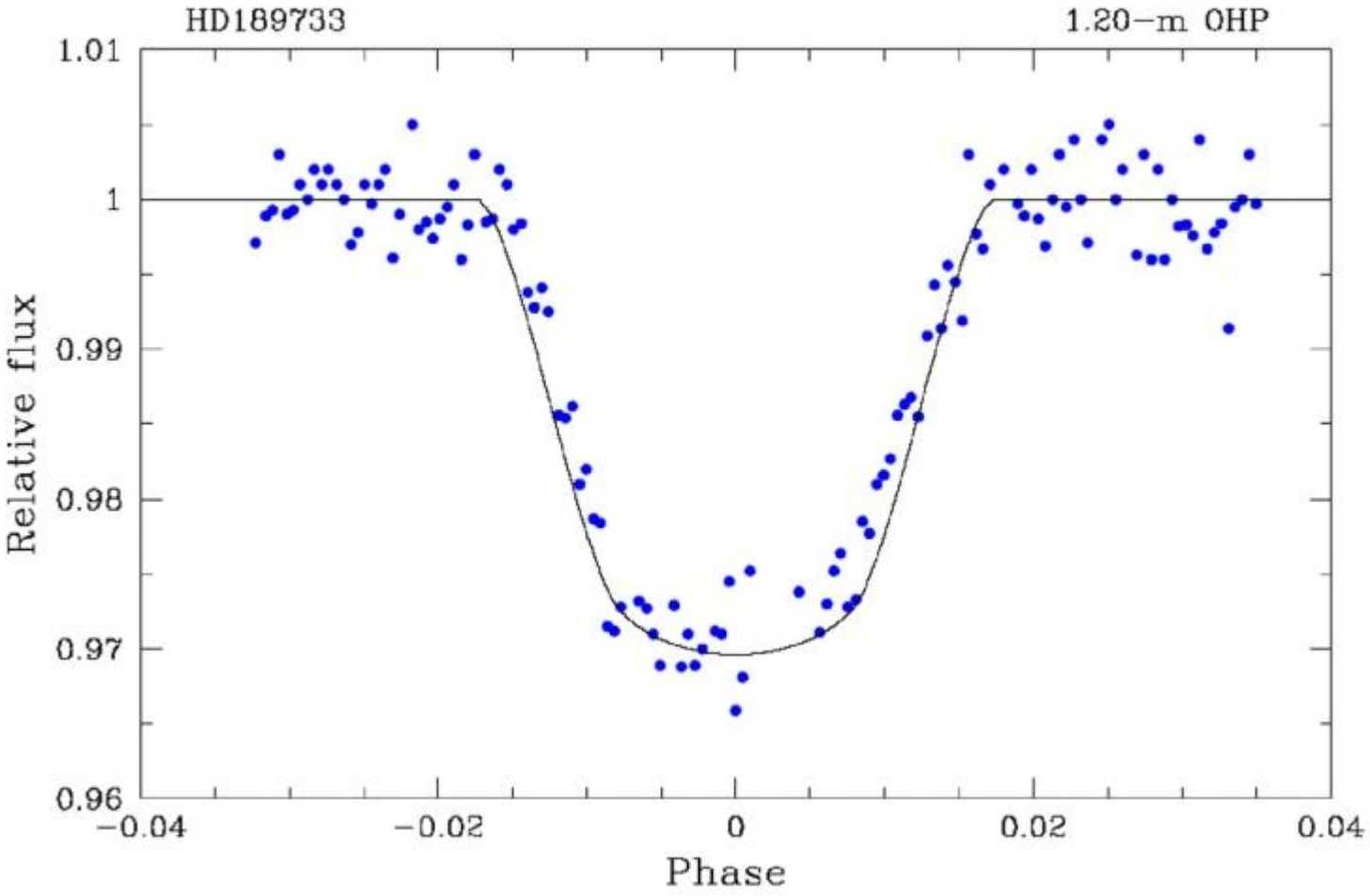


Un transit dure quelques heures.



EXOPLANÈTES : I b) Transit

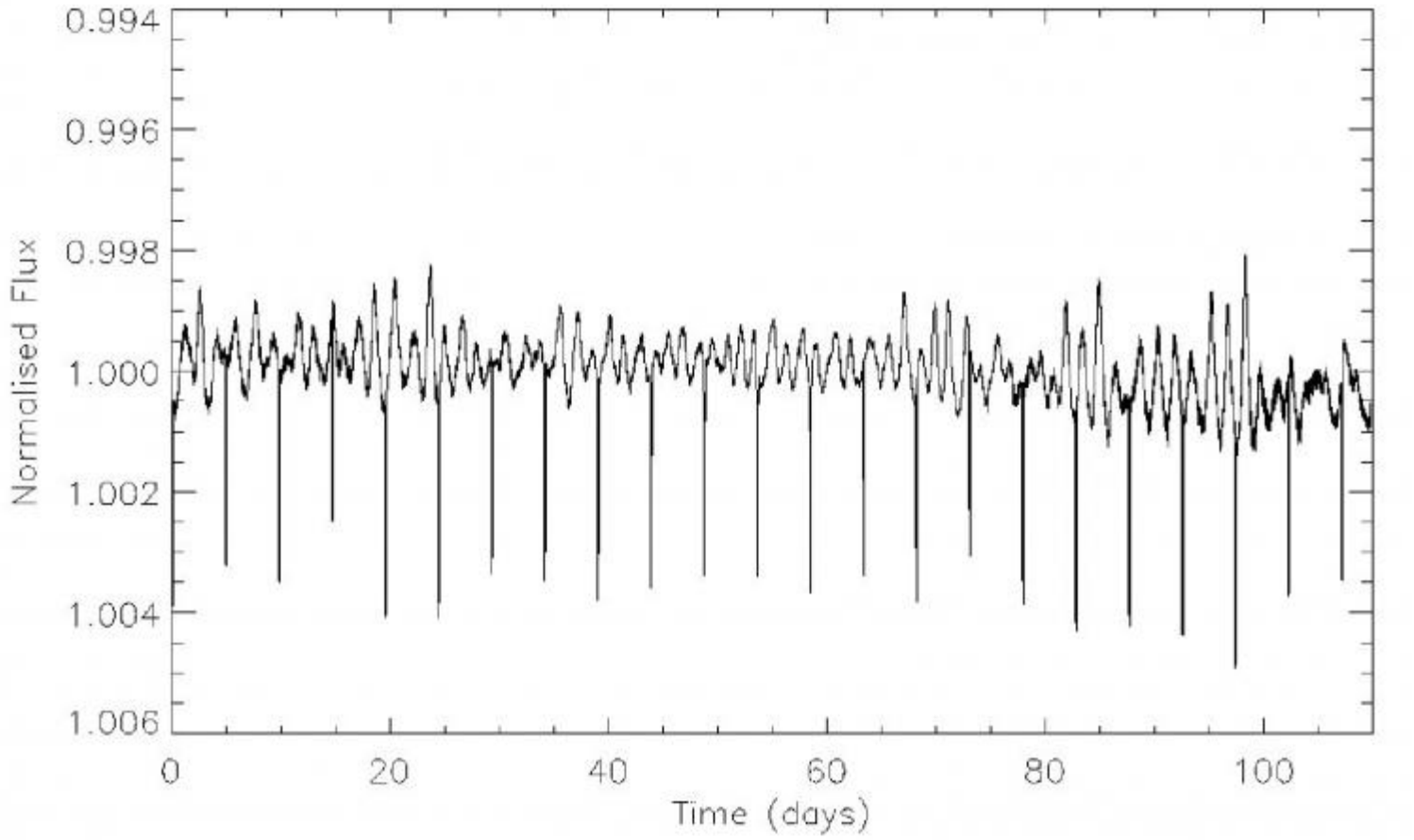
Ex: HD 189733b, vue en vitesse radiale, a aussi un transit :



EXOPLANÈTES : I b) Transit

Un transit planétaire doit être périodique.

Ex: courbe de lumière d'une étoile observée par Corot :

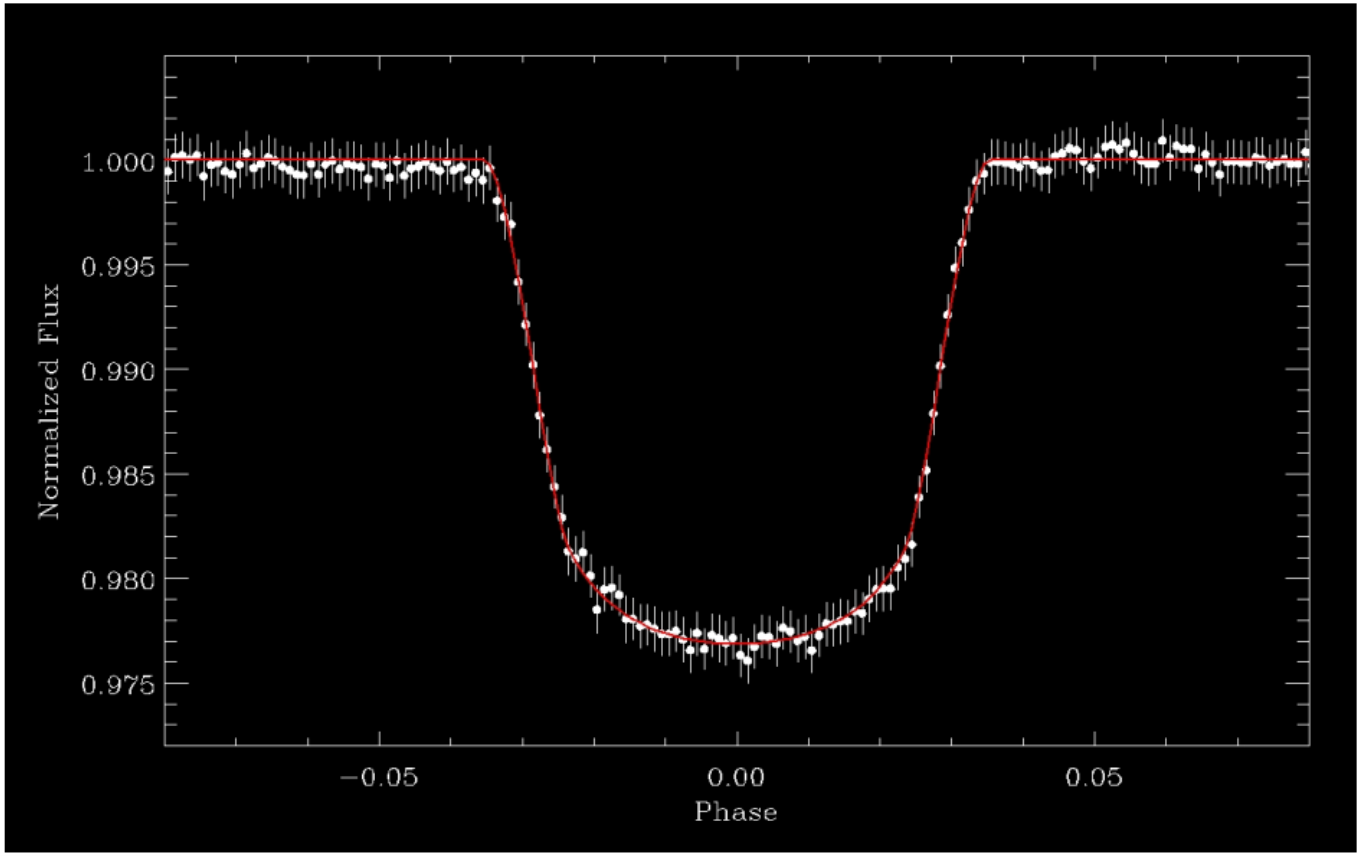


EXOPLANÈTES : I b) Transit

Corot : COnvection ROtation, et Transits planétaires.

satellite du CNES (70%), lancé le 26/12/06, qui suit les variations de luminosités de milliers d'étoiles pendant plusieurs mois consécutifs.

Ex: la première exoplanète détectée par Corot:



Copyright Corot

EXOPLANÈTES : I b) Transit

Autres projets de détection de transits :

Kepler (satellite de la NASA), lancé le 7/3/09.

A-STEP : Antartica Search for Transiting Extrasolar Planets, télescope automatique de 40cm au Dôme C, à Concordia.

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

<u>Avantages du transit :</u>

Surprises possibles...

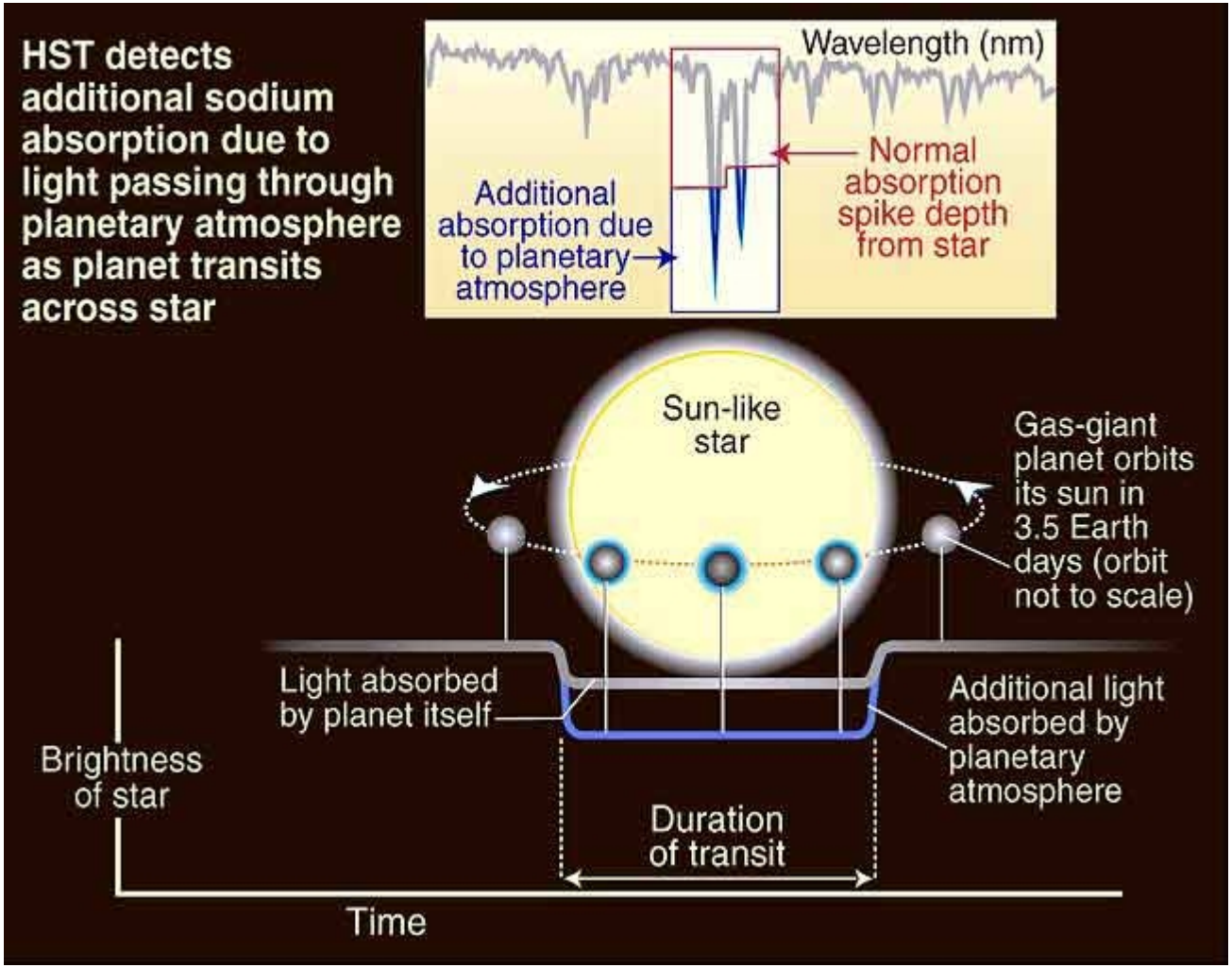
Ex: HD209458b :
grosse absorption en Lyα
lors du transit, comme si
une atmosphère d'H
de ~r_*/3 entourait la planète.



EXOPLANÈTES : I b) Transit

Avantages du transit :

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

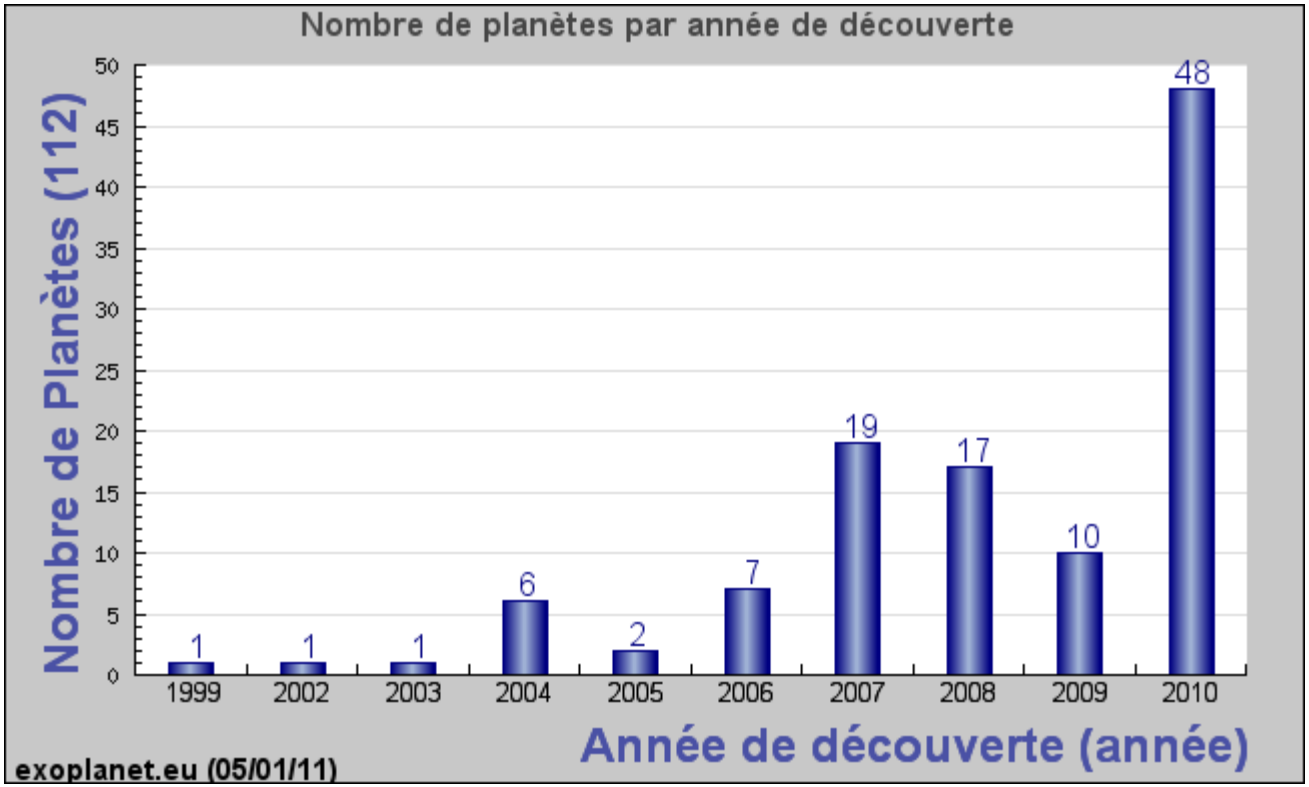


EXOPLANÈTES : I b) Transit

Détections :

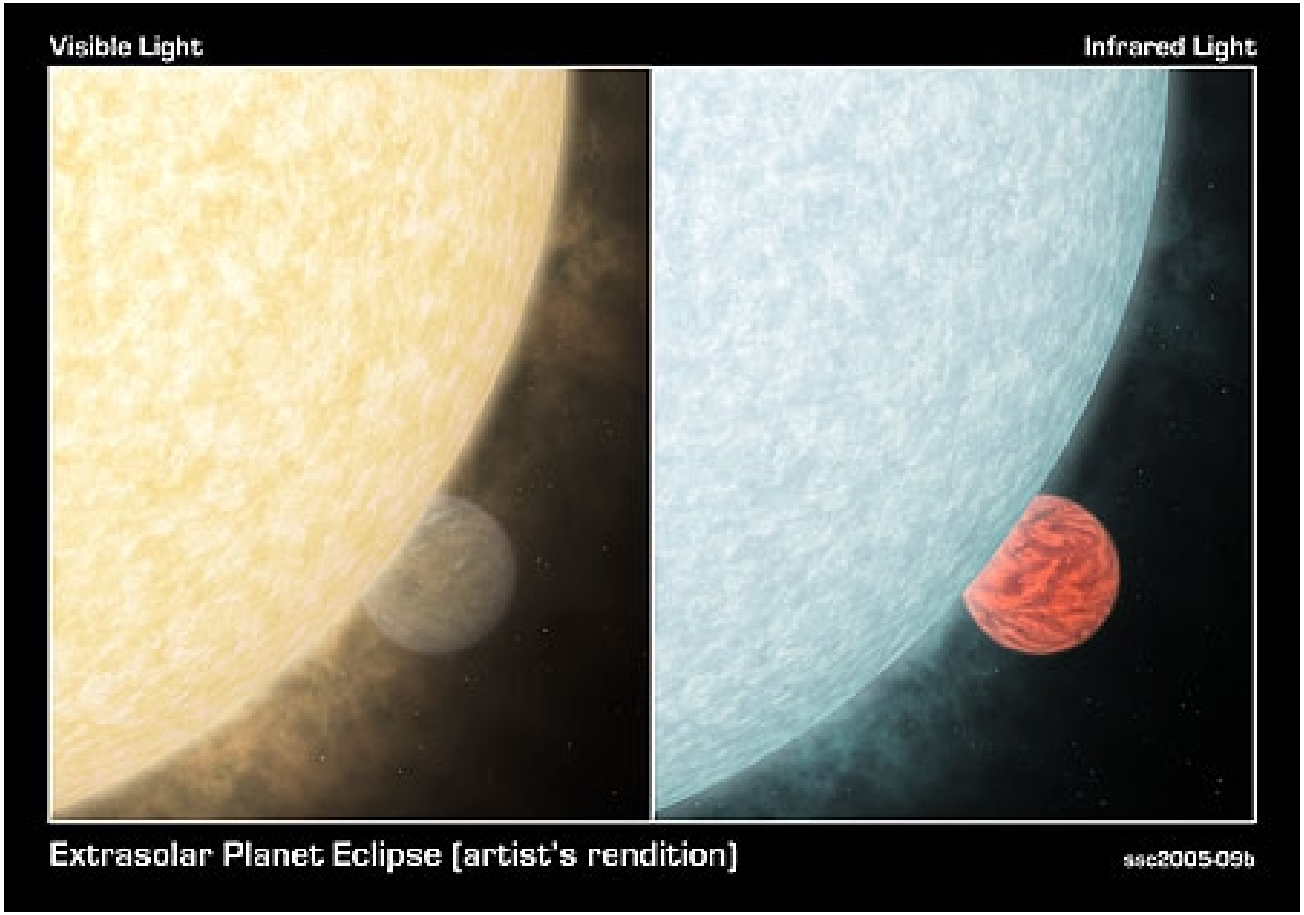
112 planètes au 1/1/11 détectées par transit, et confirmées par vélocimétrie.

Encore des centaines à venir...

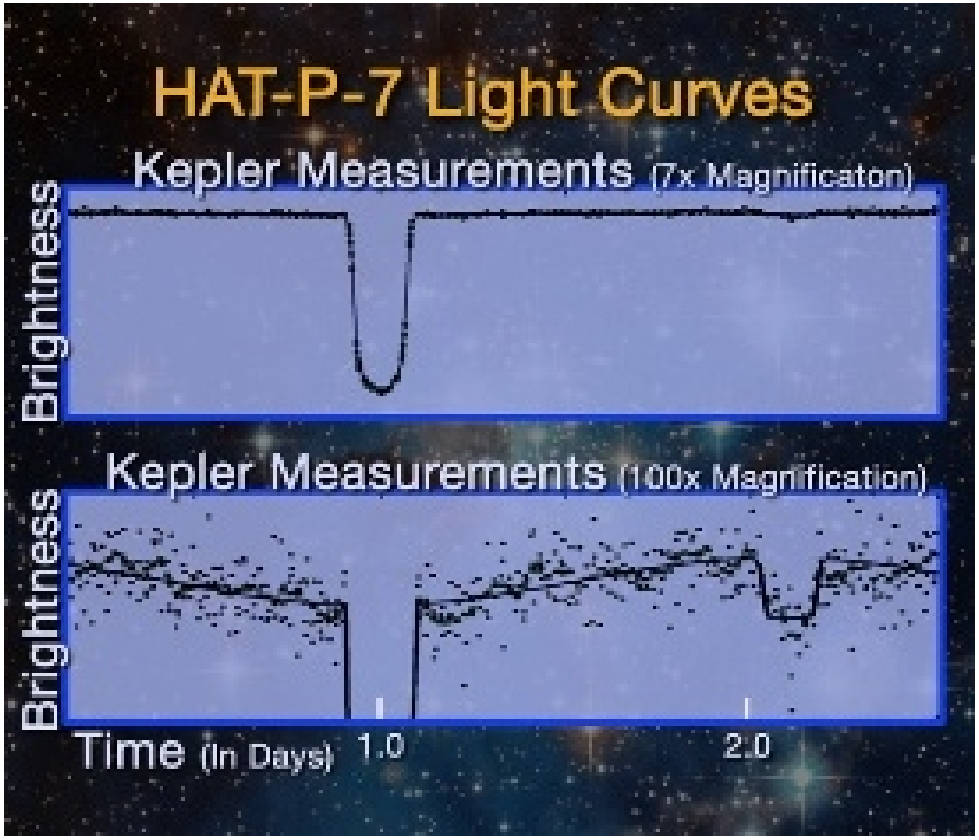


EXOPLANÈTES : I b') Transit secondaire

Quand la planète passe derrière l'étoile, sa luminosité disparait. Par soustraction, on en déduit (presque) le spectre de la planète, sa température...



EXOPLANÈTES : I b') Transit secondaire



On en déduit la brillance de la planète, donc sa température...

INTRODUCTION

Existence
Équation de Drake

I Méthodes de détection indirectes

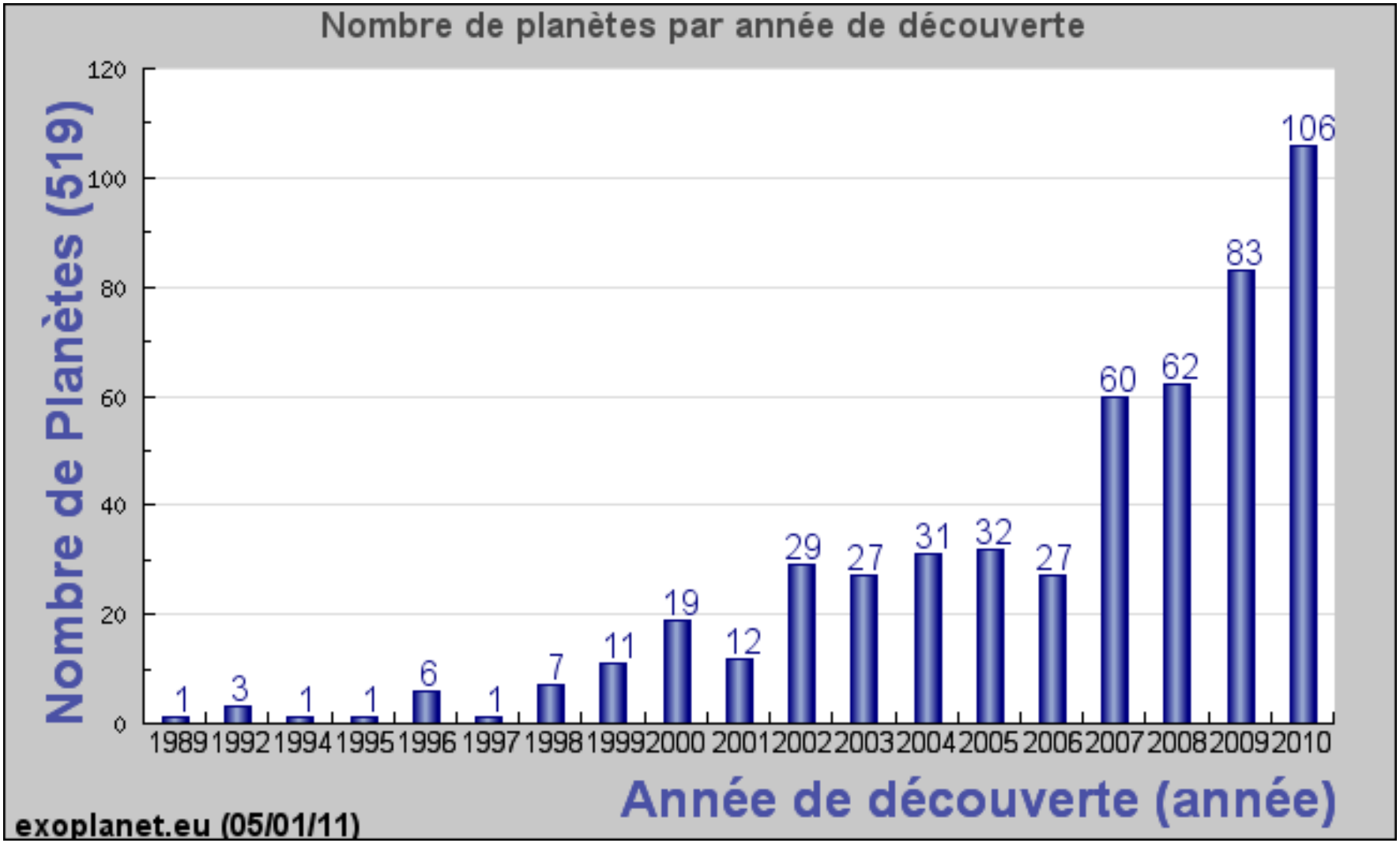
Vitesse radiale (vélocimétrie)
Transit (photométrie)

II Propriétés et statistiques

Masse, demi-grand axe, période, excentricité, rayon, métallicité de l'étoile hôte, densité, spectre...

Synthèse de Population de Planètes

EXOPLANÈTES



EXOPLANÈTES

Habitables ? Définissons une planète habitable.

EXOPLANÈTES

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).

EXOPLANÈTES

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).





EXOPLANÈTES

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

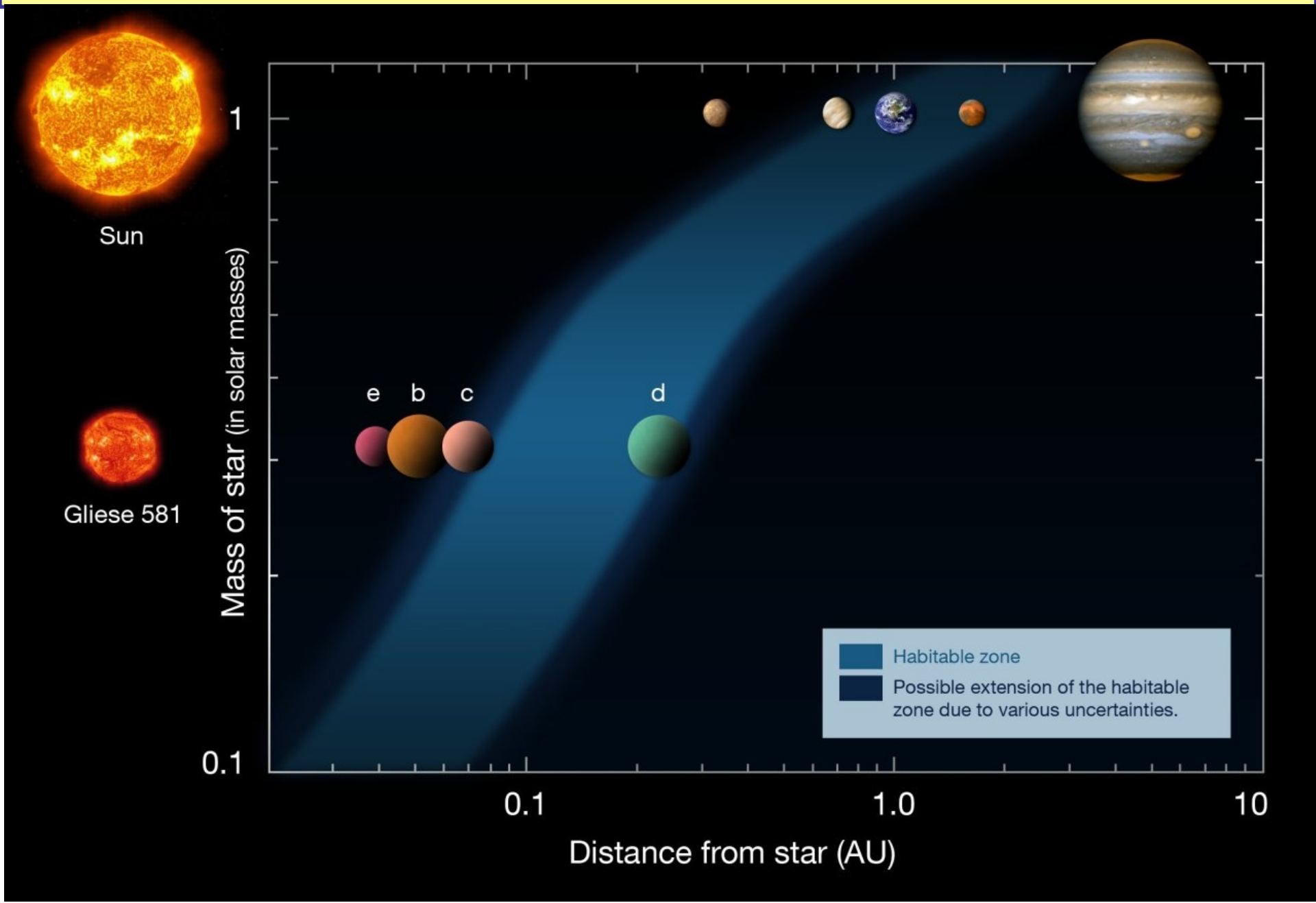
+ climat stable

+ pas trop de bombardement météoritique

+ champ magnétique

...

EXOPLANÈTES



EXOPLANÈTES



EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Nous n'avons plus 1 seul système solaire sous la main, mais des centaines. Les modèles de formation planétaire doivent tenir compte de cette diversité, et expliquer ces propriétés.

Attention : chaque méthode a ses biais.

En être conscient lorsqu'on fait des statistiques.

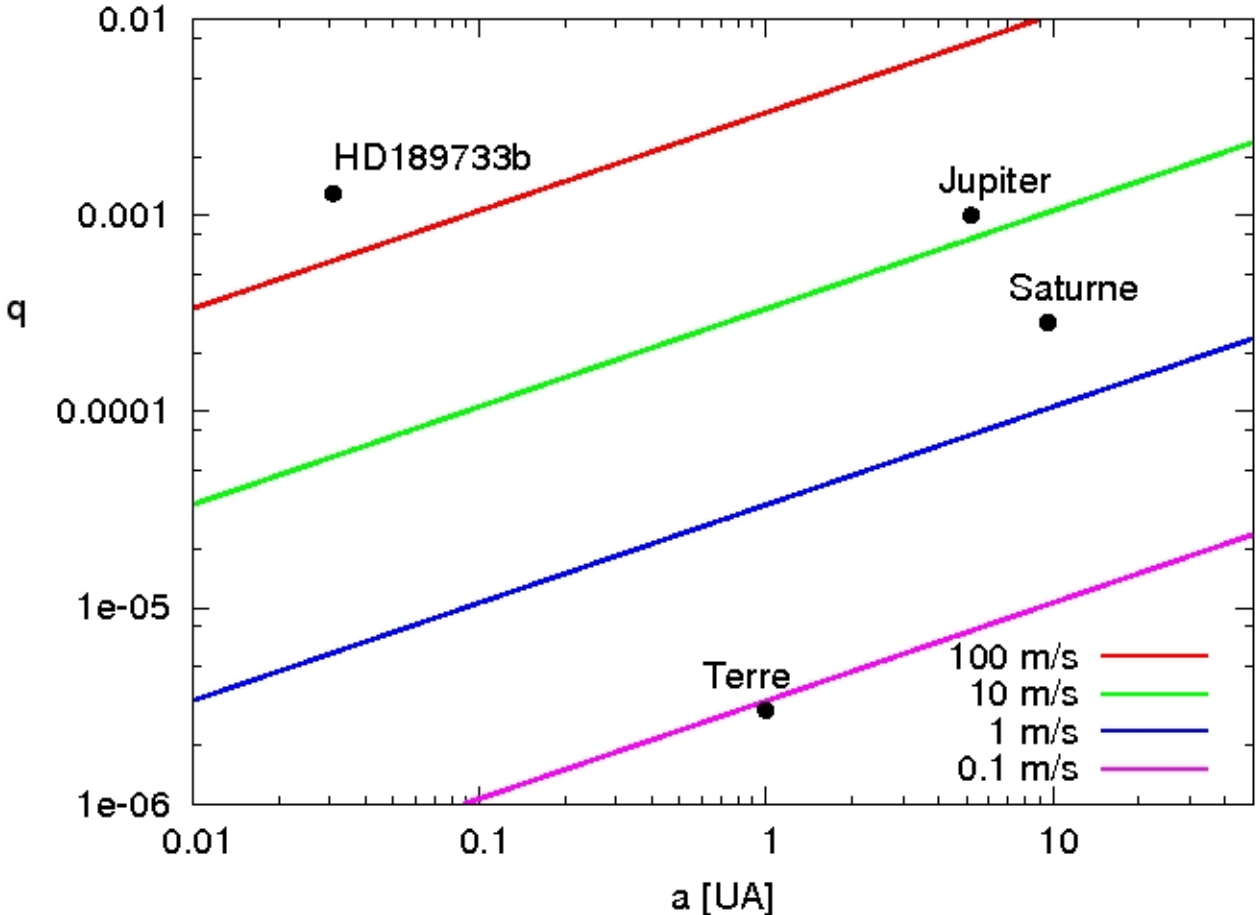
EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Vélocimétrie : On mesure actuellement des différences de vitesse de l'ordre de 1 m/s.

Détectabilité :

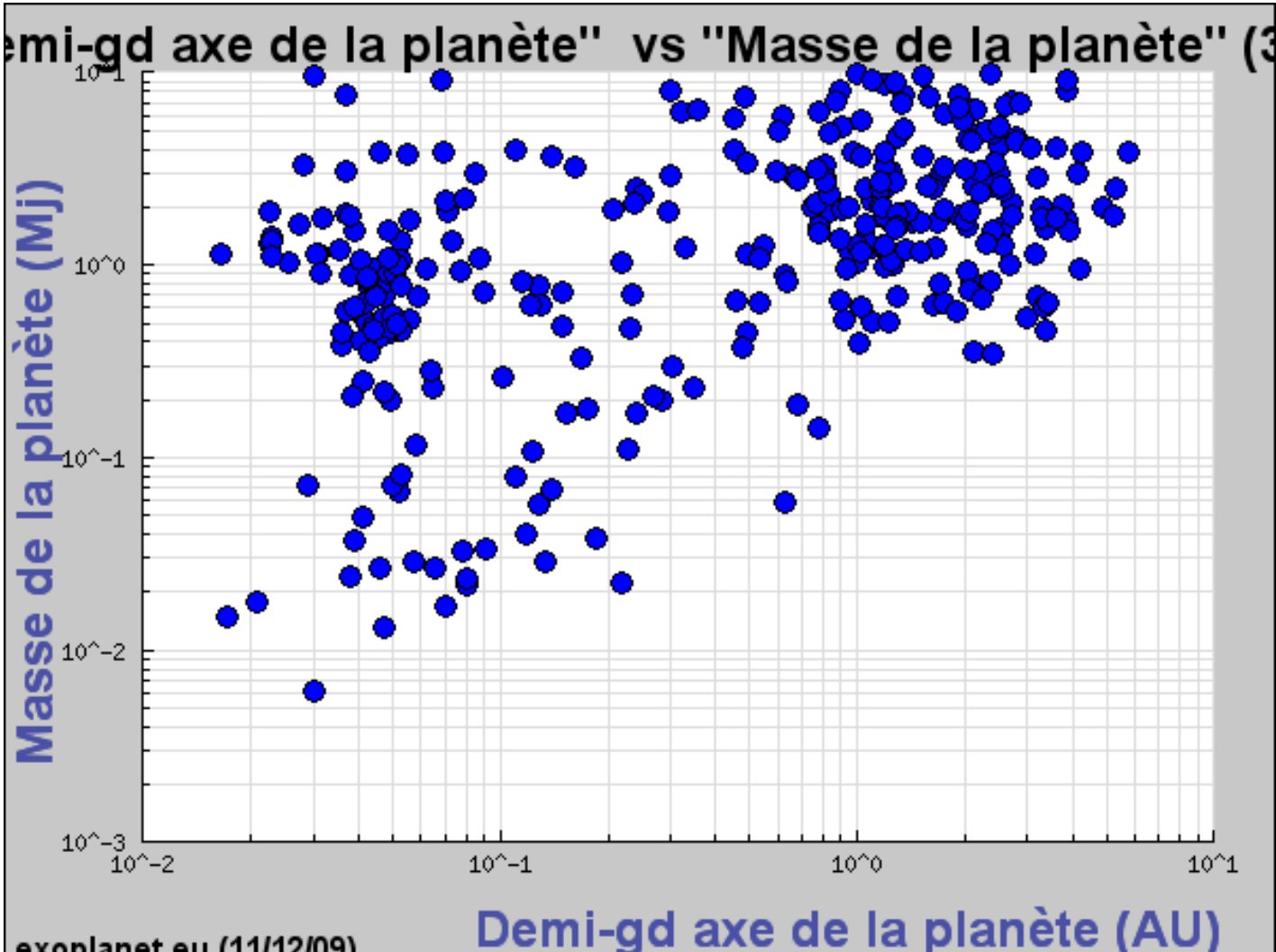
$\delta v = q\,(GM_*/a)^{1/2}$.

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



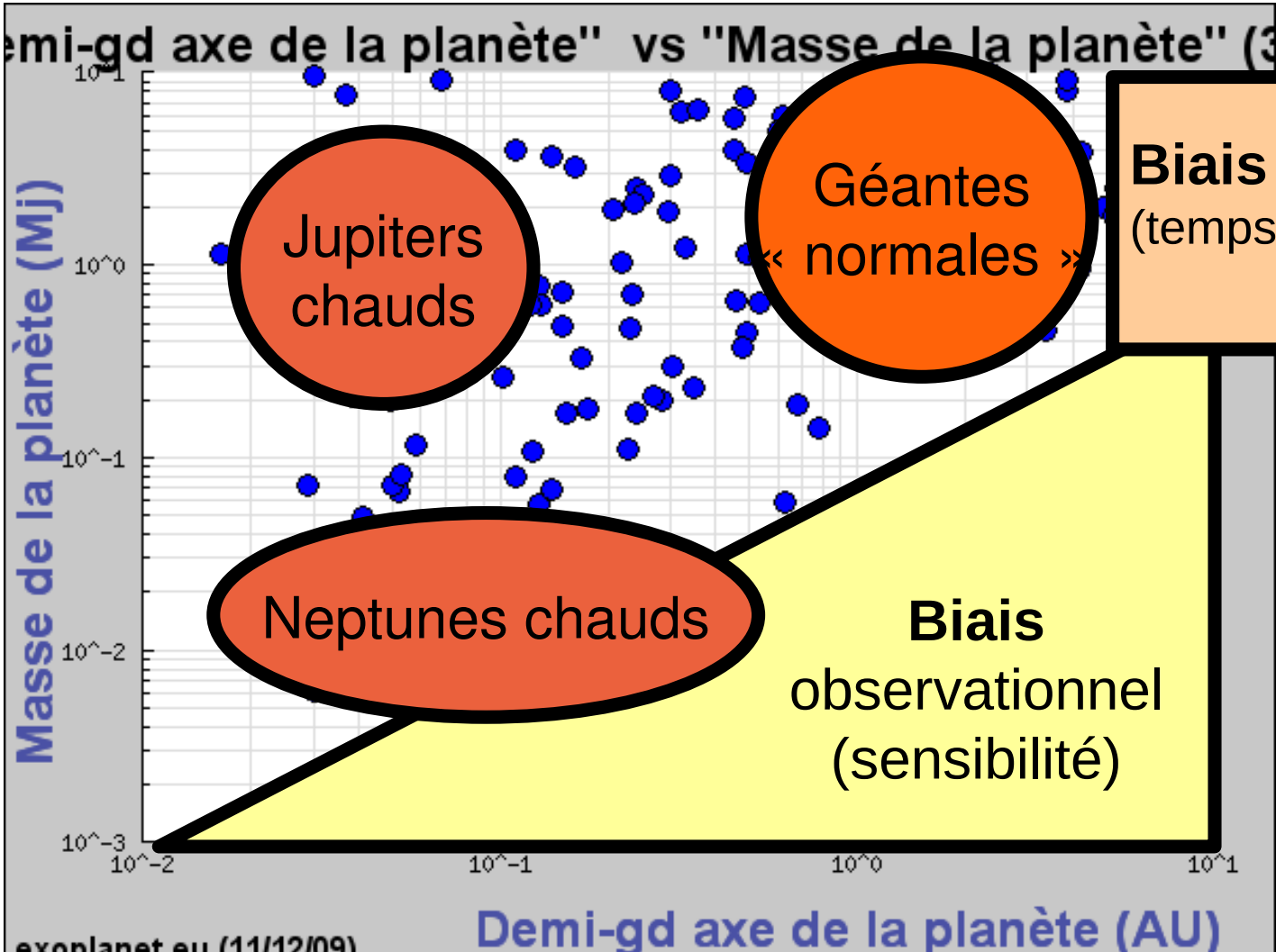
EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Détections :



EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Détections :



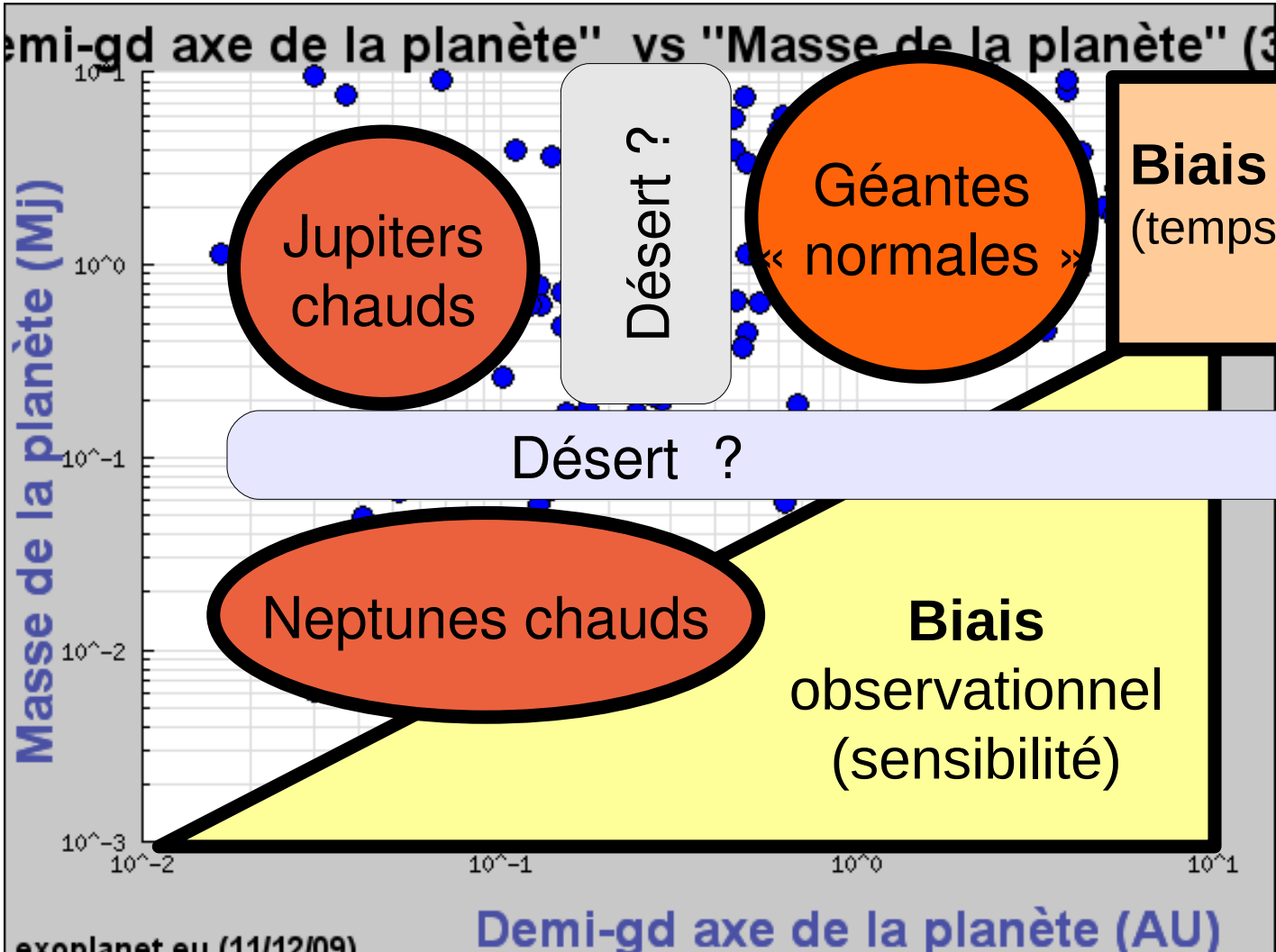
EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Détections :

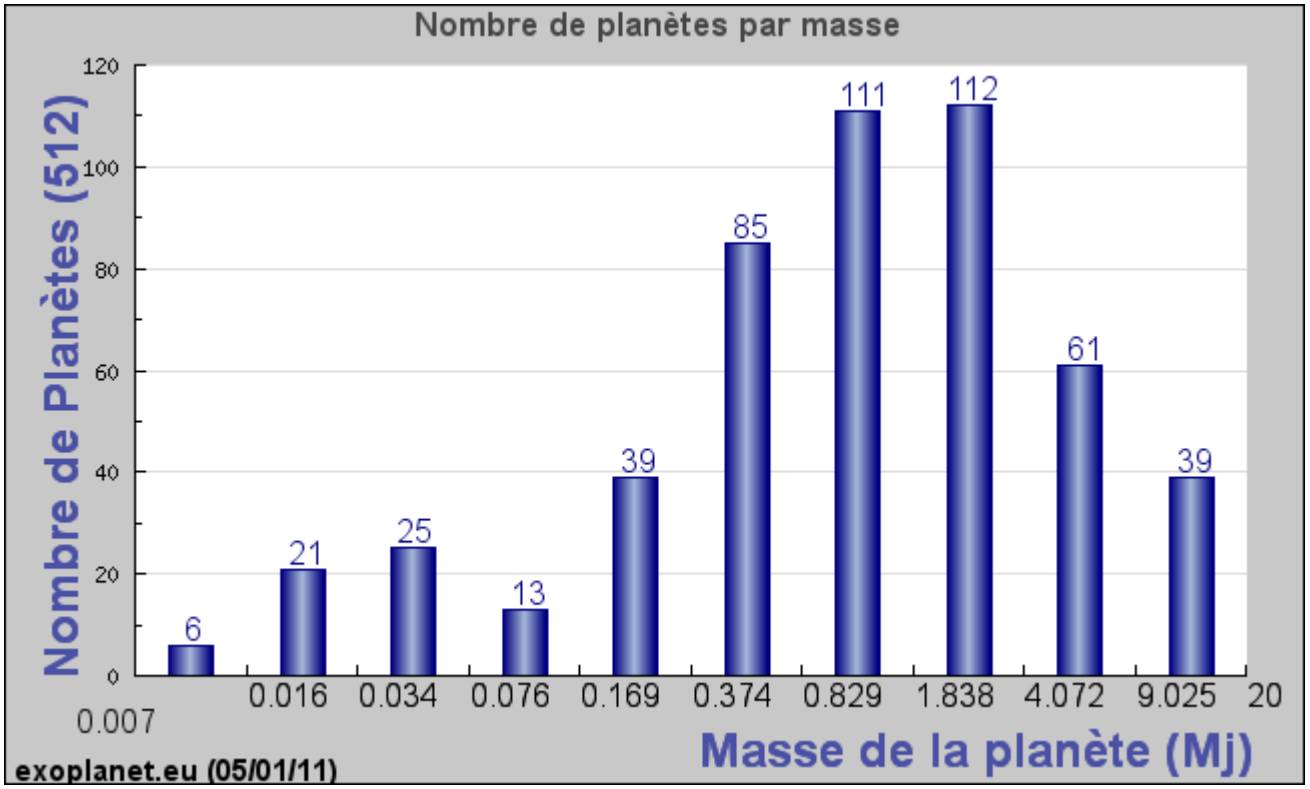
Nonobstant les biais obs-ervationnels,

on distingue 3 populations,

séparées par 2 déserts.



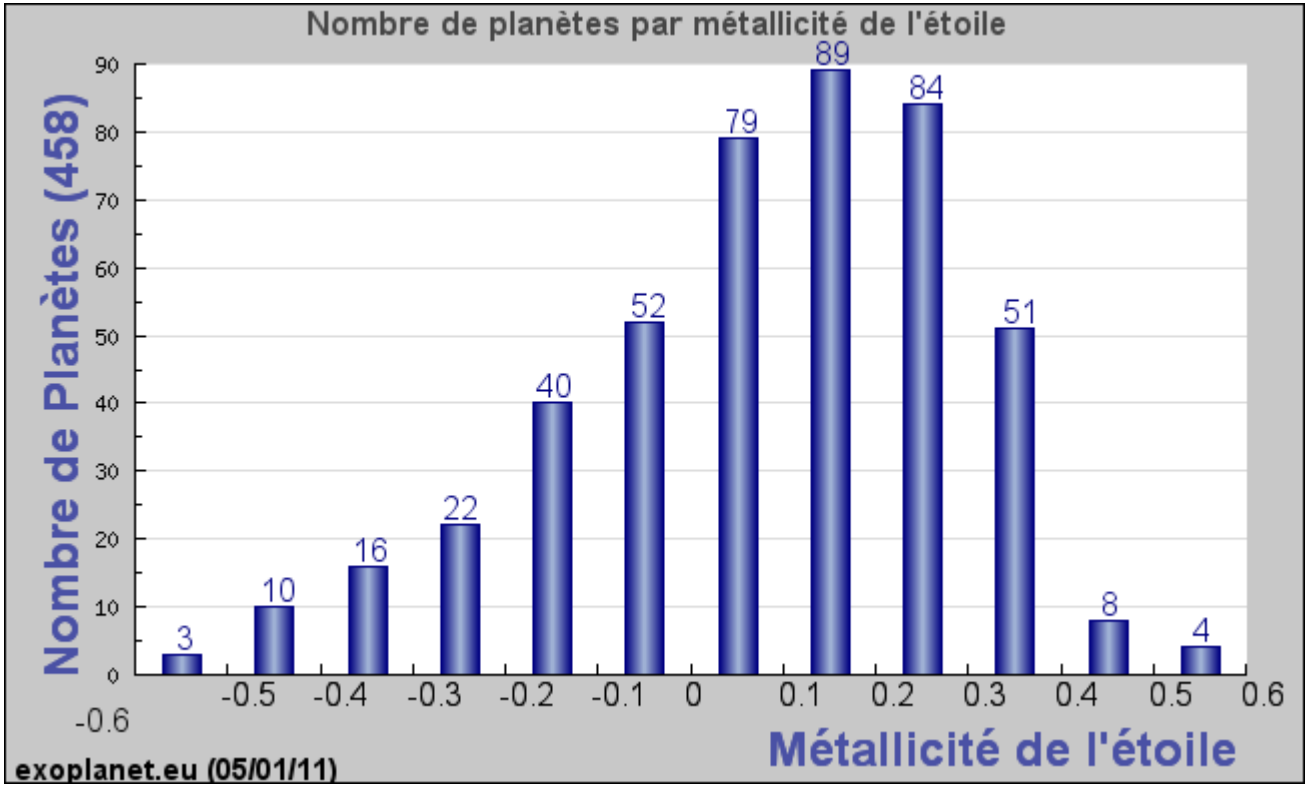
EXOPLANÈTES : II) Statistiques



Les statistiques en masses sont cohérentes avec le modèle d'accrétion de cœur des planètes géantes : on passe très rapidement d'une masse de Neptune à une masse de Jupiter.

Soit la durée de vie du disque est suffisante pour obtenir une géante gazeuse, soit elle ne l'est pas et on garde un cœur, une géante de glace.

EXOPLANÈTES : II) Statistiques



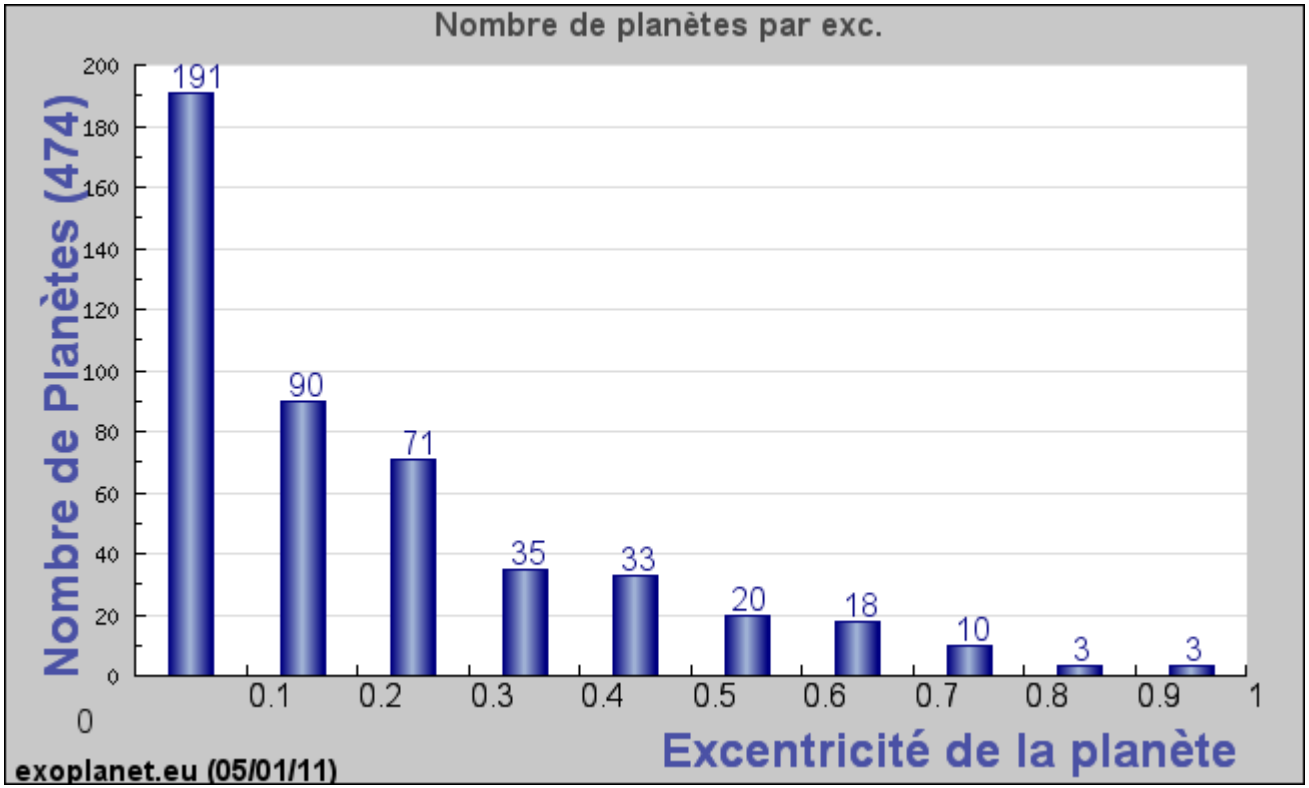
Forte influence de la métallicité de l'étoile hôte !

La probabilité de présence de planète(s) augmente avec Z.

Pourquoi ?

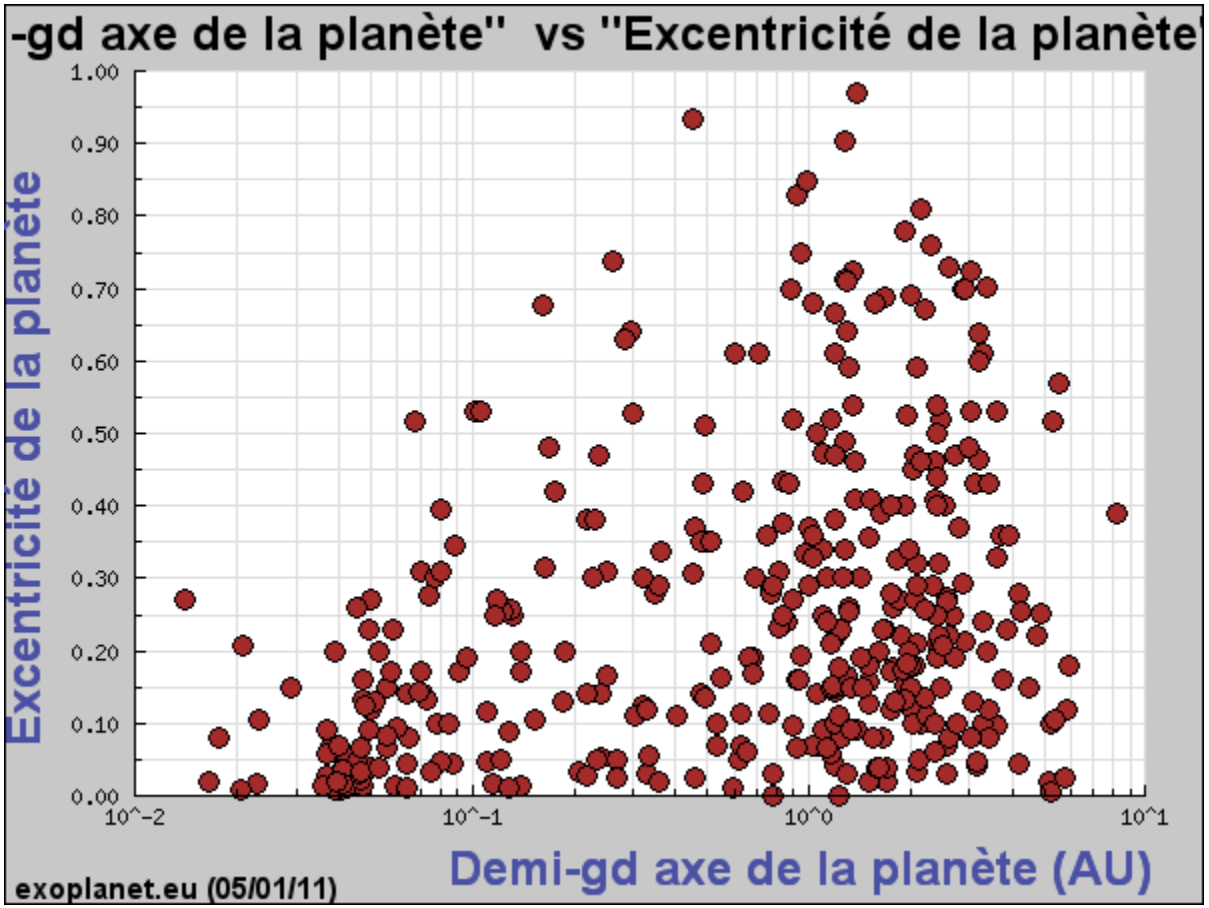
EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Excentricités :



EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Corrélation a – e ?



EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Synthèse de population :

Cuisine avec tout ce que nous avons vu jusqu'à présent :

accrétion, migration, évolution du disque, etc.

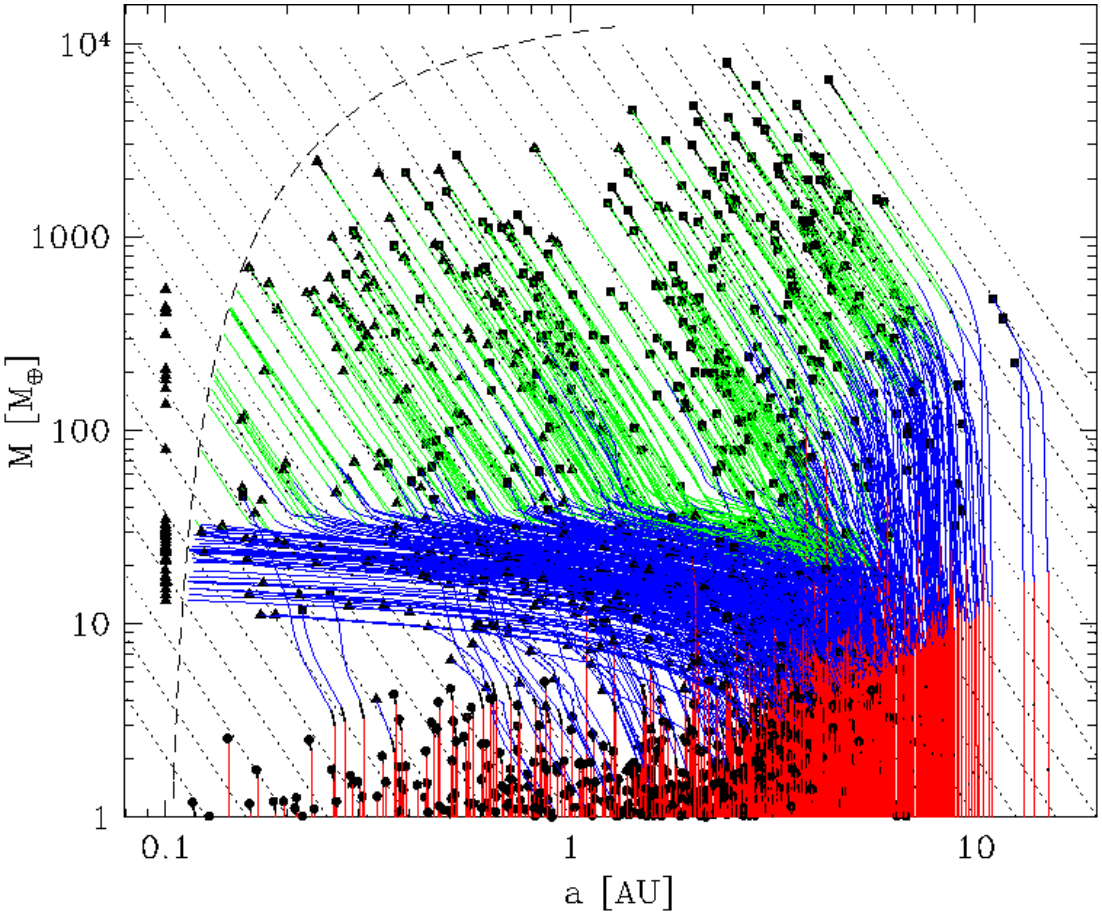
Programmer l'évolution d'un embryon, à partir d'une masse et d'un demi-grand axe initial.

Répéter l'opération pour toute une distribution de conditions initiales.

EXOPLANÈTES : II) Statistiques

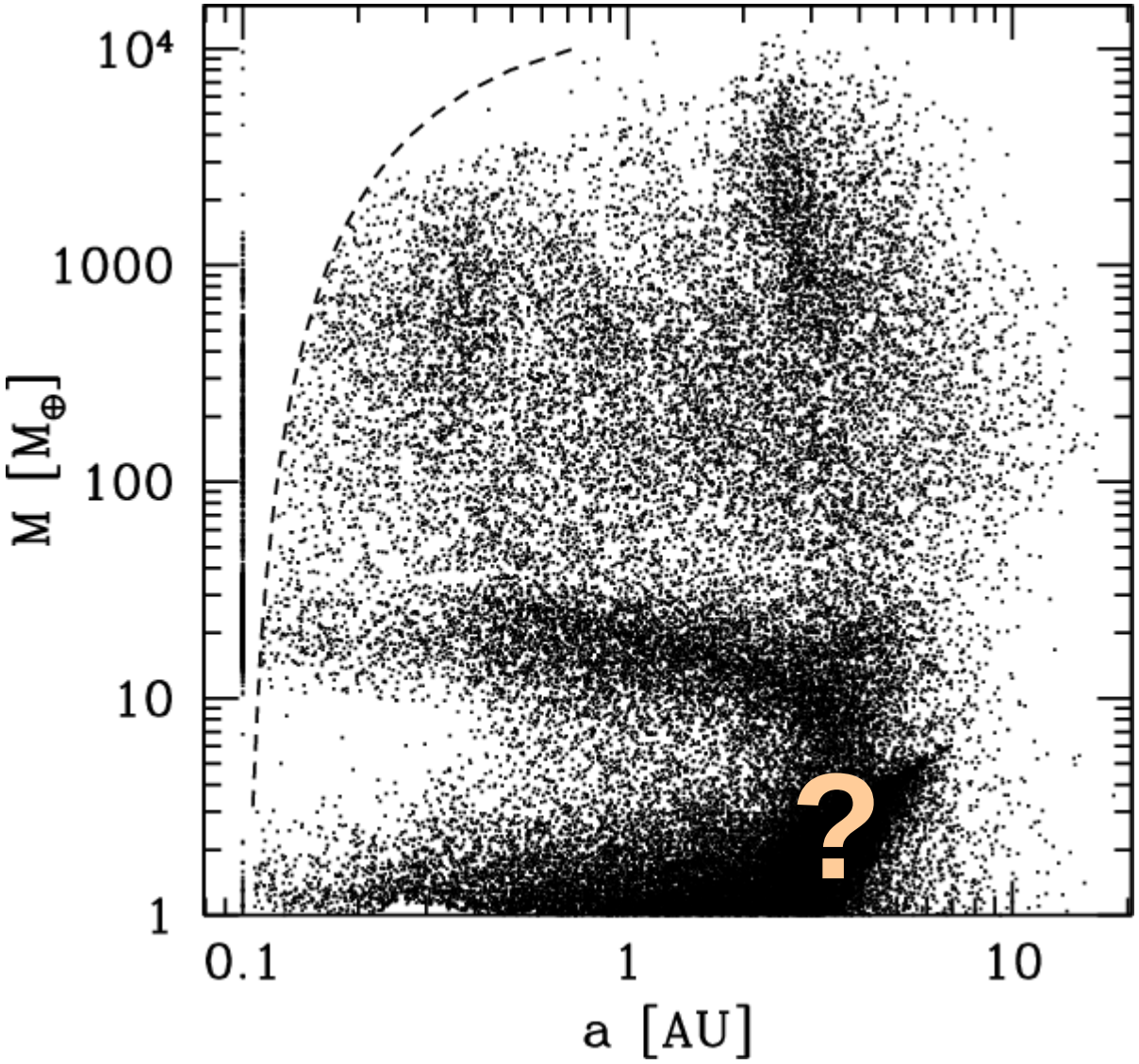
Synthèse de population

(Mordasini, Alibert, Benz, Naef, 2009).



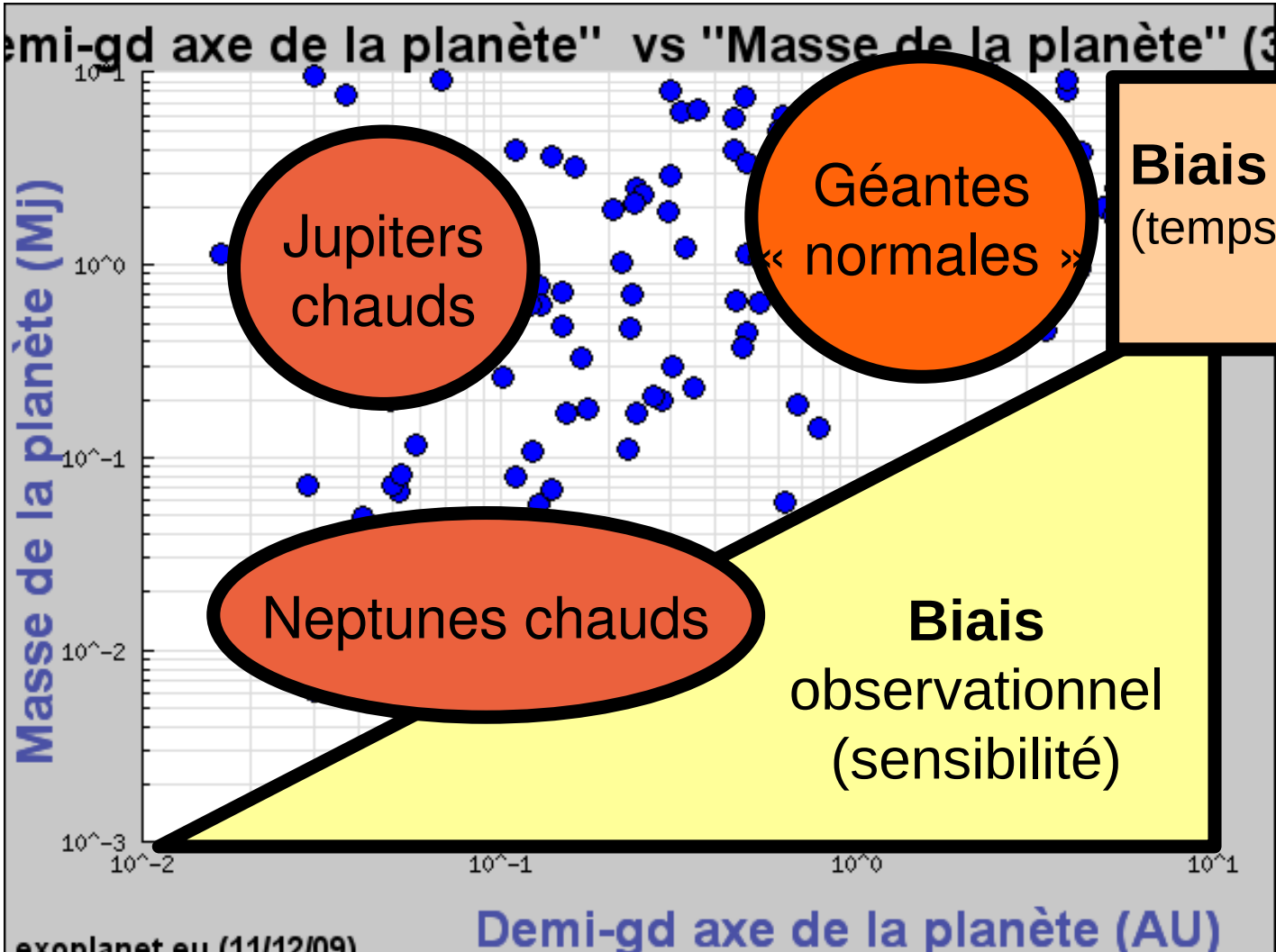
EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Synthèse de population :



EXOPLANÈTES : II) Statistiques

Détections :



EXOPLANÈTES

Voir www.exoplanet.eu :

données, statistiques, corrélations, ...