



# ***Des planètes aux exoplanètes***

Conférence donnée par  
**Arnaud Cassan**

Institut d'Astrophysique de Paris  
Université Pierre et Marie Curie/CNRS

au

**26<sup>ème</sup> Festival d'astronomie de Fleurance**

Lundi 8 août 2016, de 11h15 à 12h45, Centre culturel de Fleurance

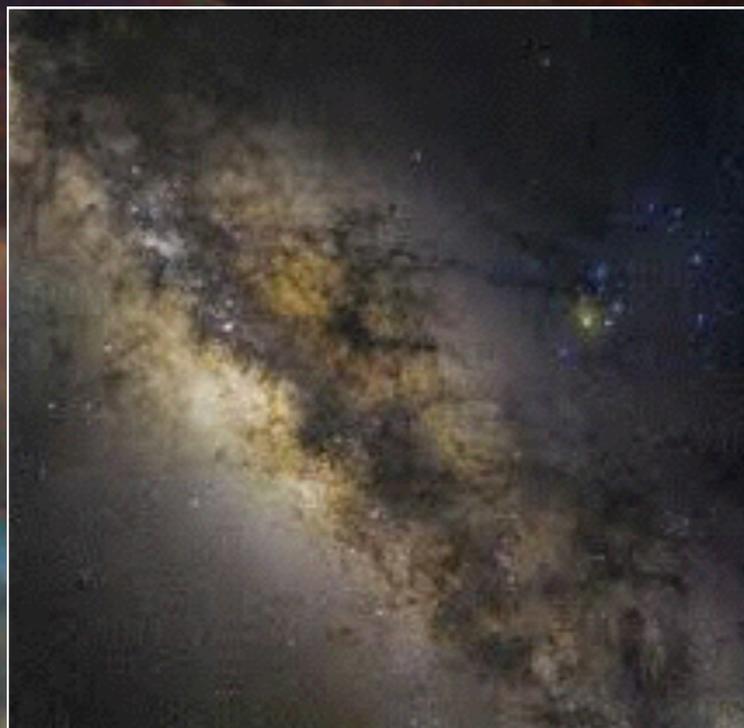
# Quelque part dans l'Univers...

Des centaines de milliards de galaxies...



(simulation)

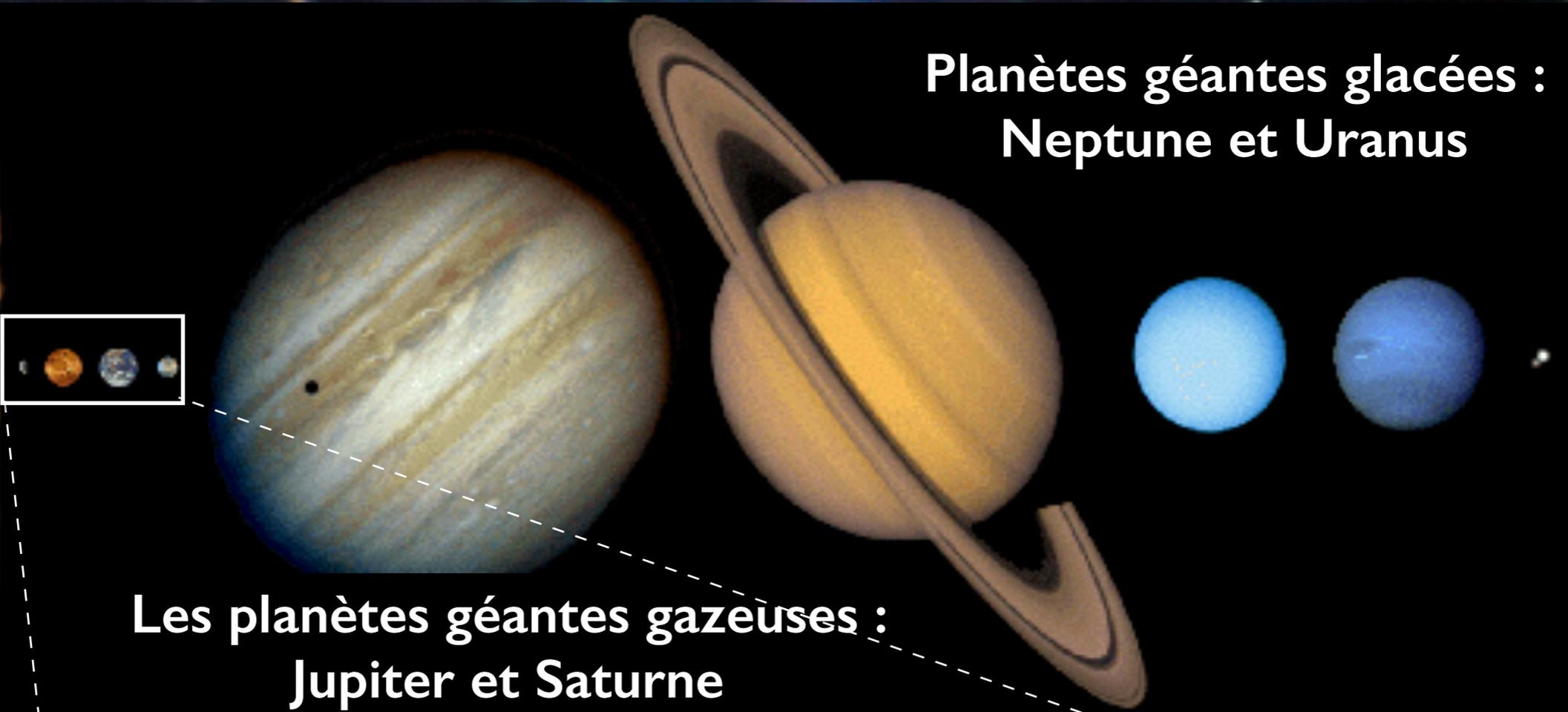
La Voie Lactée, notre galaxie...



*... le système solaire, notre chez nous*



# ... le système solaire, notre chez nous



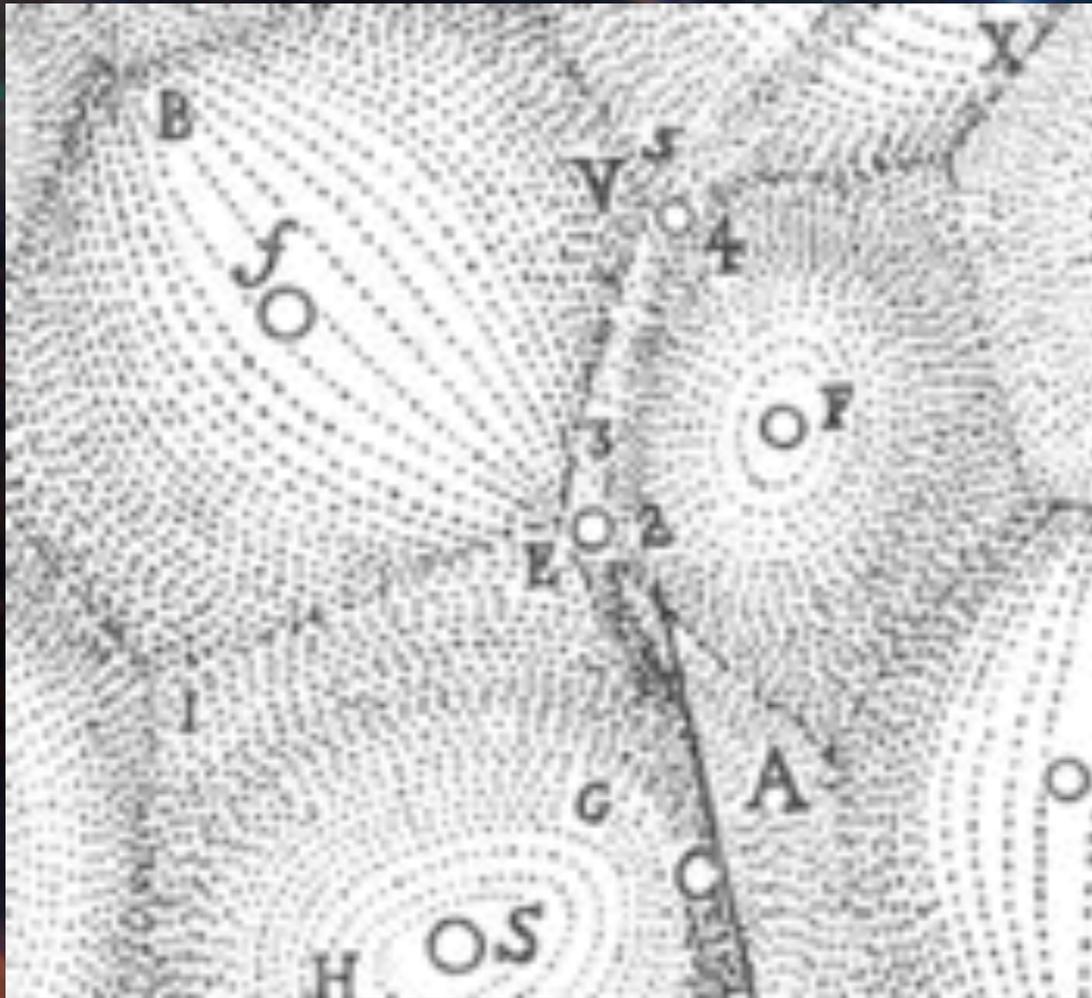
**Planètes géantes glacées :  
Neptune et Uranus**

**Les planètes géantes gazeuses :  
Jupiter et Saturne**



**Les planètes terrestres :  
Mercure, Venus, Terre, Mars**

# Comment naissent les planètes ?



... par éjection de matière par des comètes qui percutent le Soleil ?

... dans des tourbillons d'éther ?

... par capture de planètes par l'étoile lors de son mouvement dans la Galaxie ?



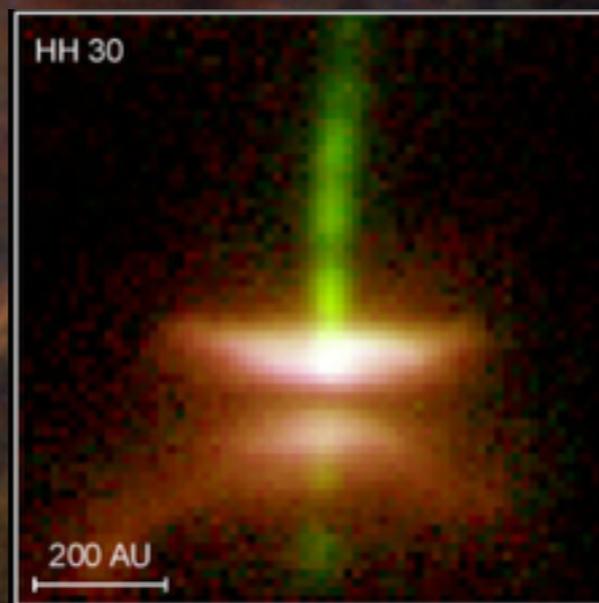
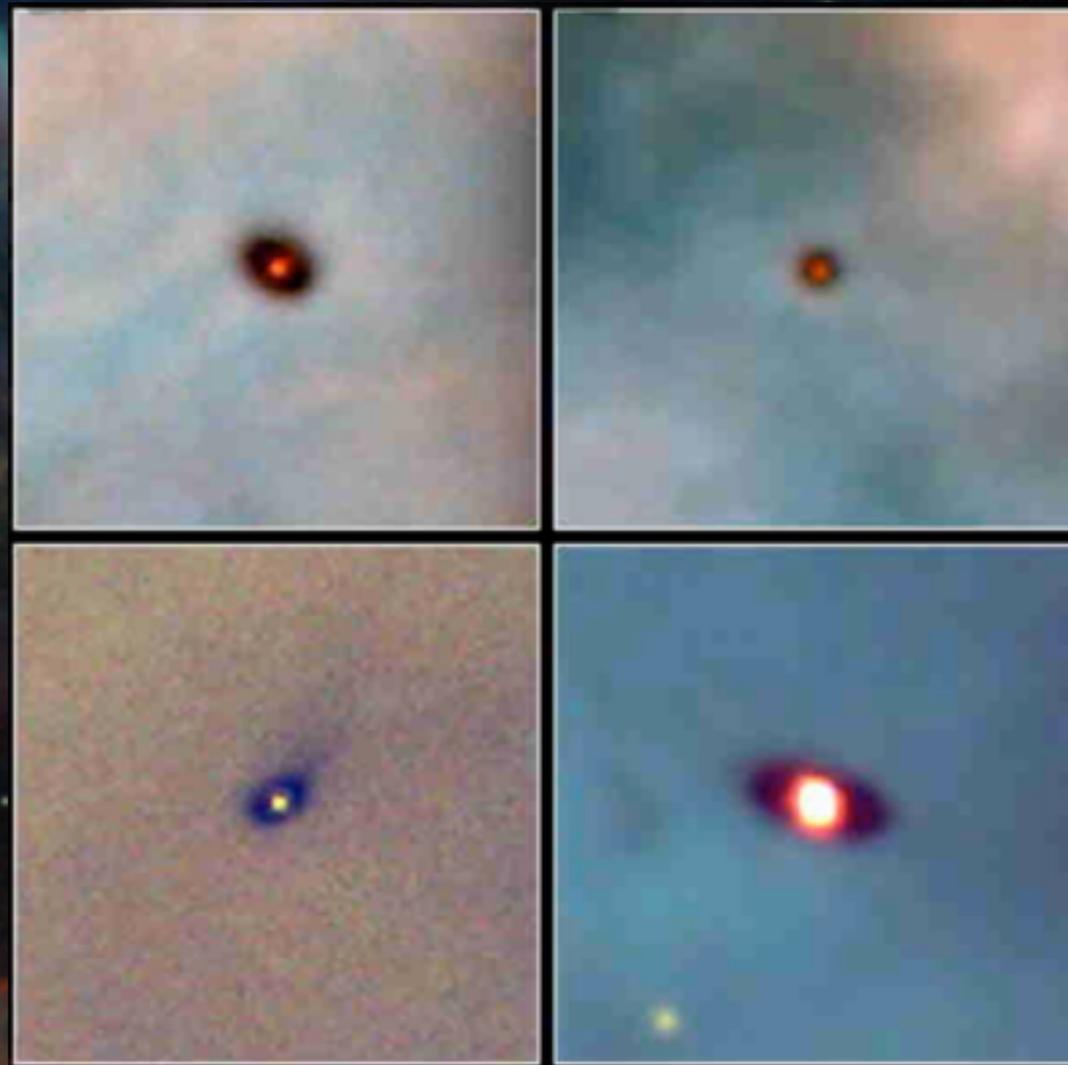
# Le berceau des étoiles

## Les cocons stellaires



Nuages moléculaires géants

## Détails des cocons



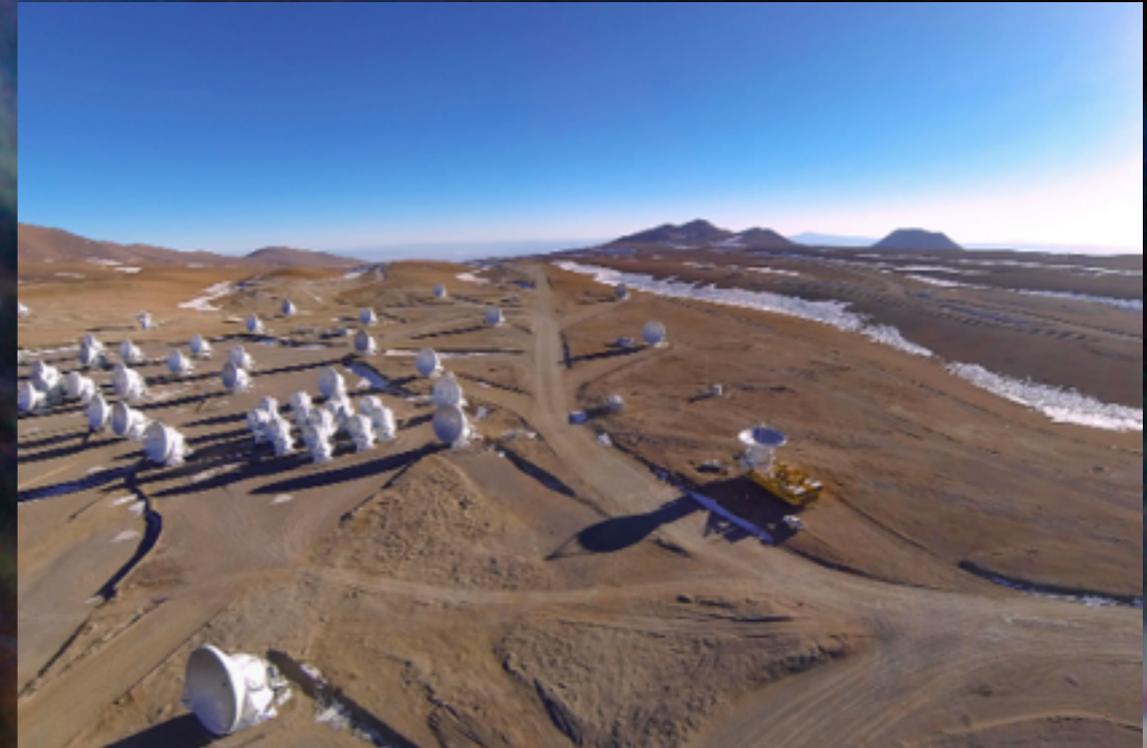
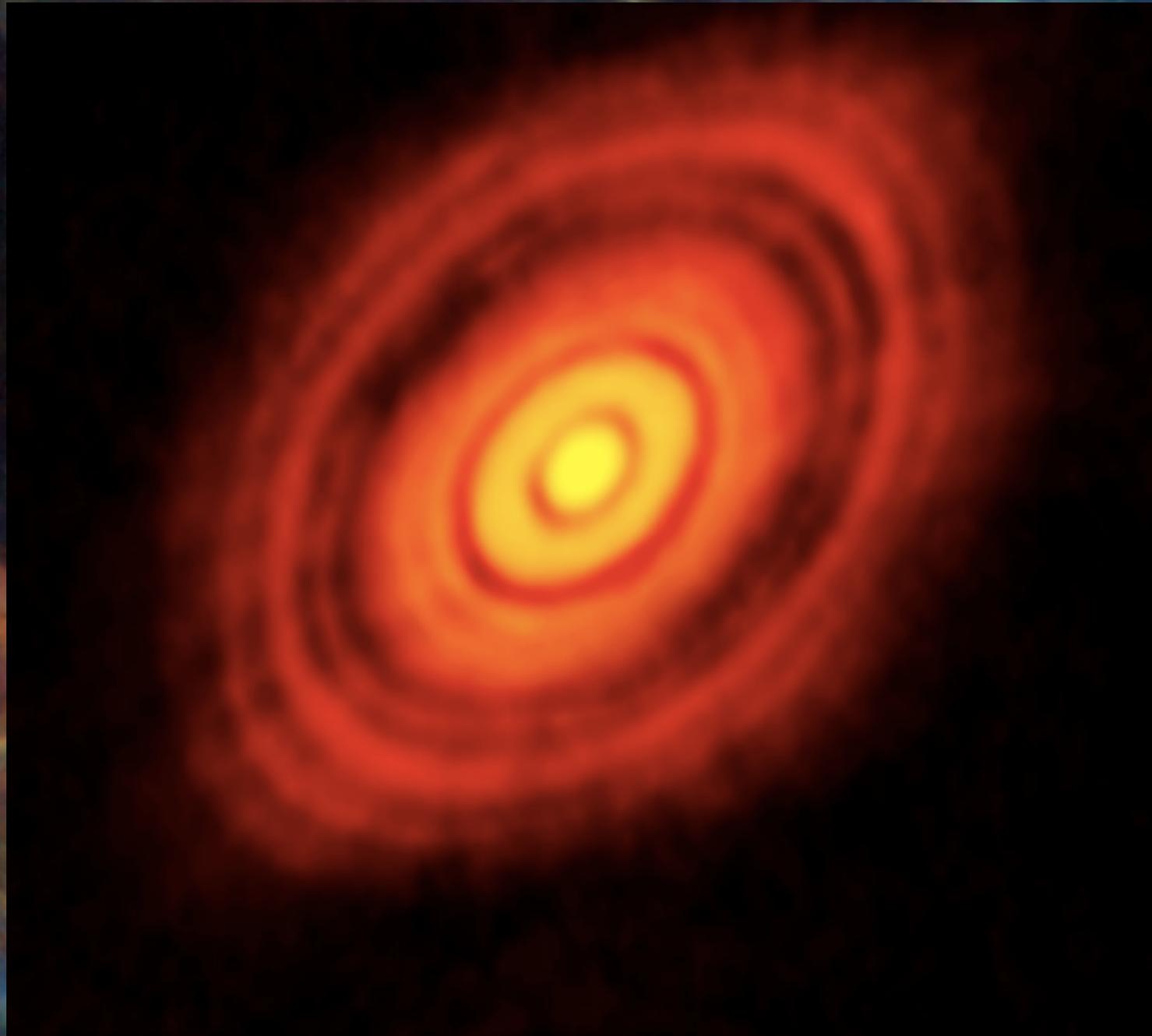
HH 30

200 AU

Vu de la tranche, un disque de poussière et un jet entourent la jeune étoile

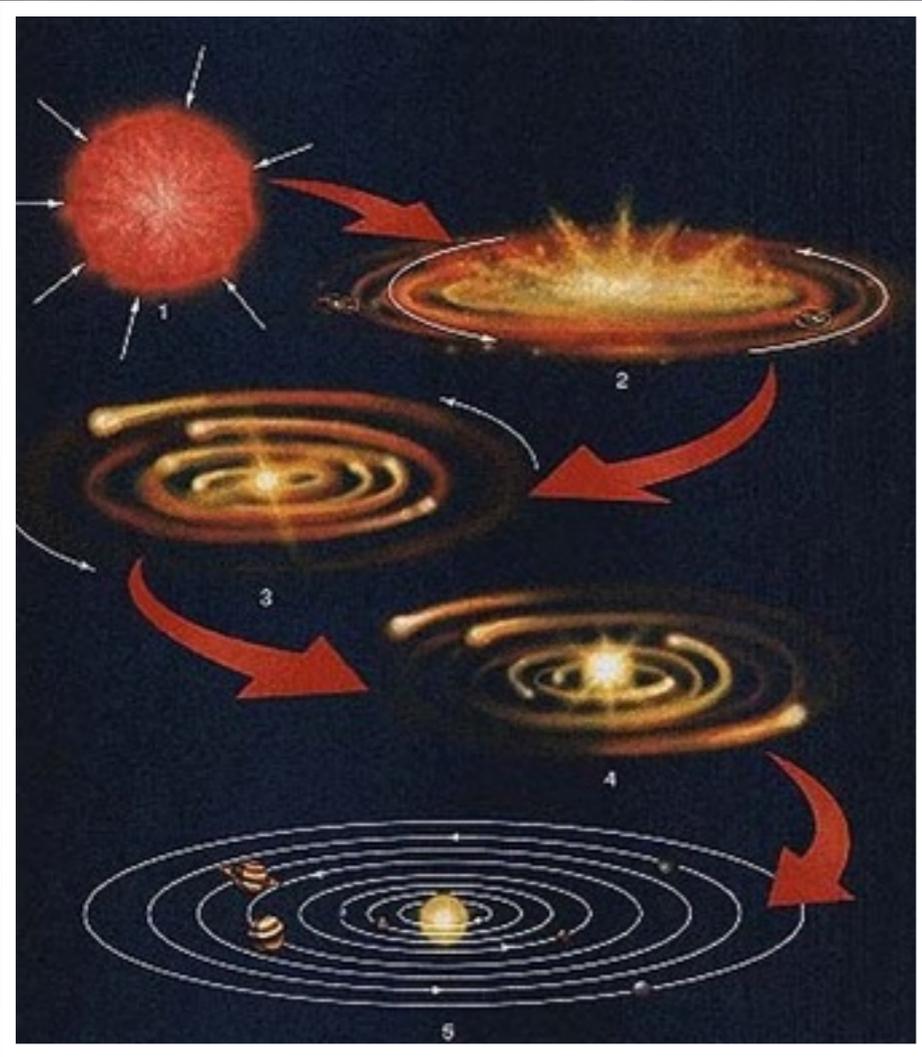
# Le berceau des étoiles

Des disques de gaz et de poussière autour des jeunes étoiles

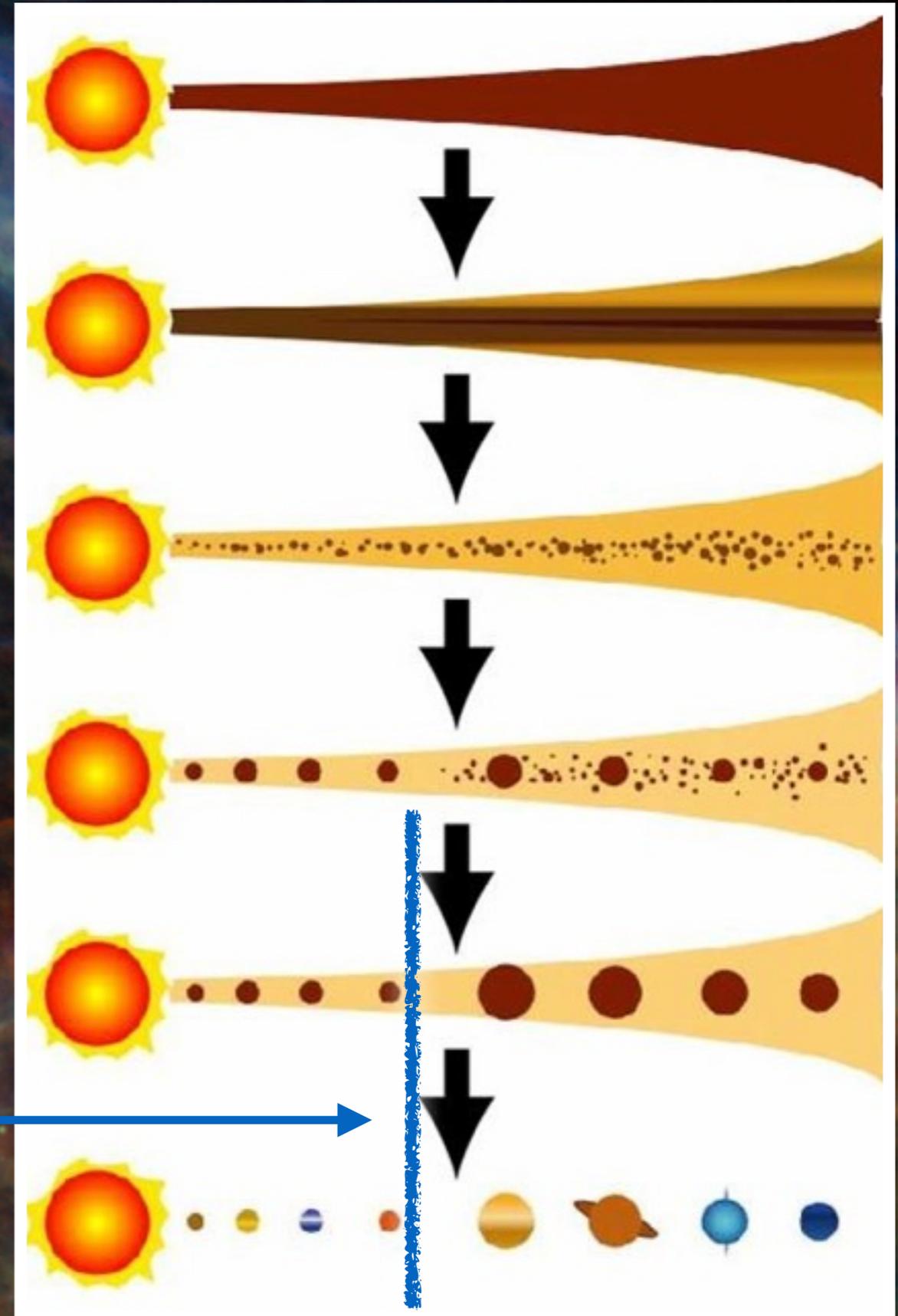


Ce n'est pas une « vue d'artiste » mais bien une image réelle prise avec le radiotélescope ALMA !

# Formation du système solaire : l'avant exoplanètes

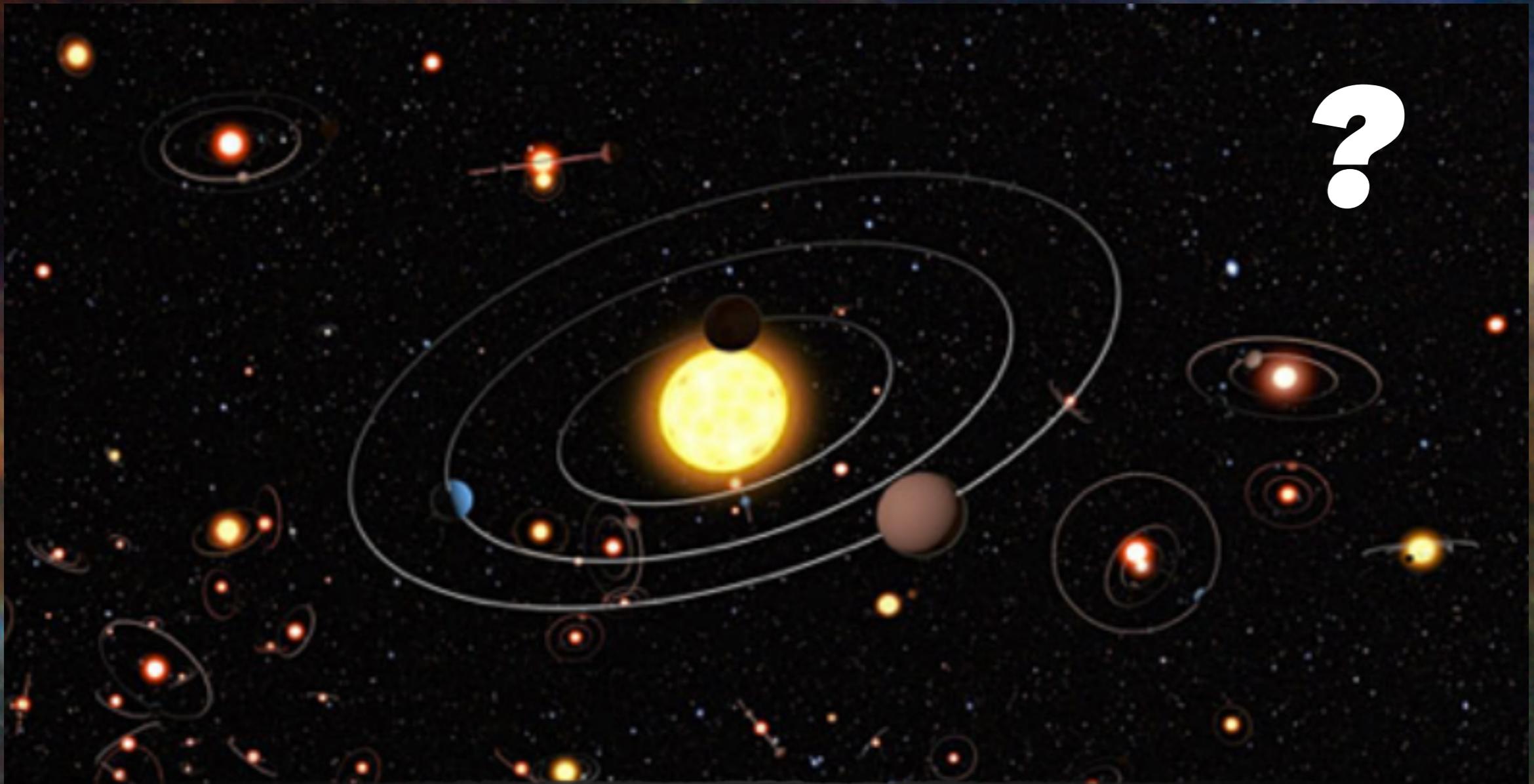


En bleu la ligne des glaces : distance à l'étoile ou les glaces (eau, gaz carbonique...) peuvent se former. Au-delà de cette ligne, de gros corps peuvent se former, en particulier des planètes géantes



# Vers la recherche d'autres systèmes planétaires

- Grandes difficultés pour détecter des planètes autour d'autres étoiles que le Soleil
- Détecter les planètes géantes est plus simple, mais elles ne bougent pas vite (ex. révolution de Jupiter autour du Soleil : 12 ans)
- De nombreuses fausses alertes (dont une célèbre : mouvement de l'étoile de Barnard dans les années 1960)



... des découvertes, enfin !

1992 : Des exoplanètes autour d'un pulsar !  
**PSR B1257+12 bcd**

NATURE · VOL 355 · 9 JANUARY 1992

## A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12

A. Wolszczan\* & D. A. Frail†

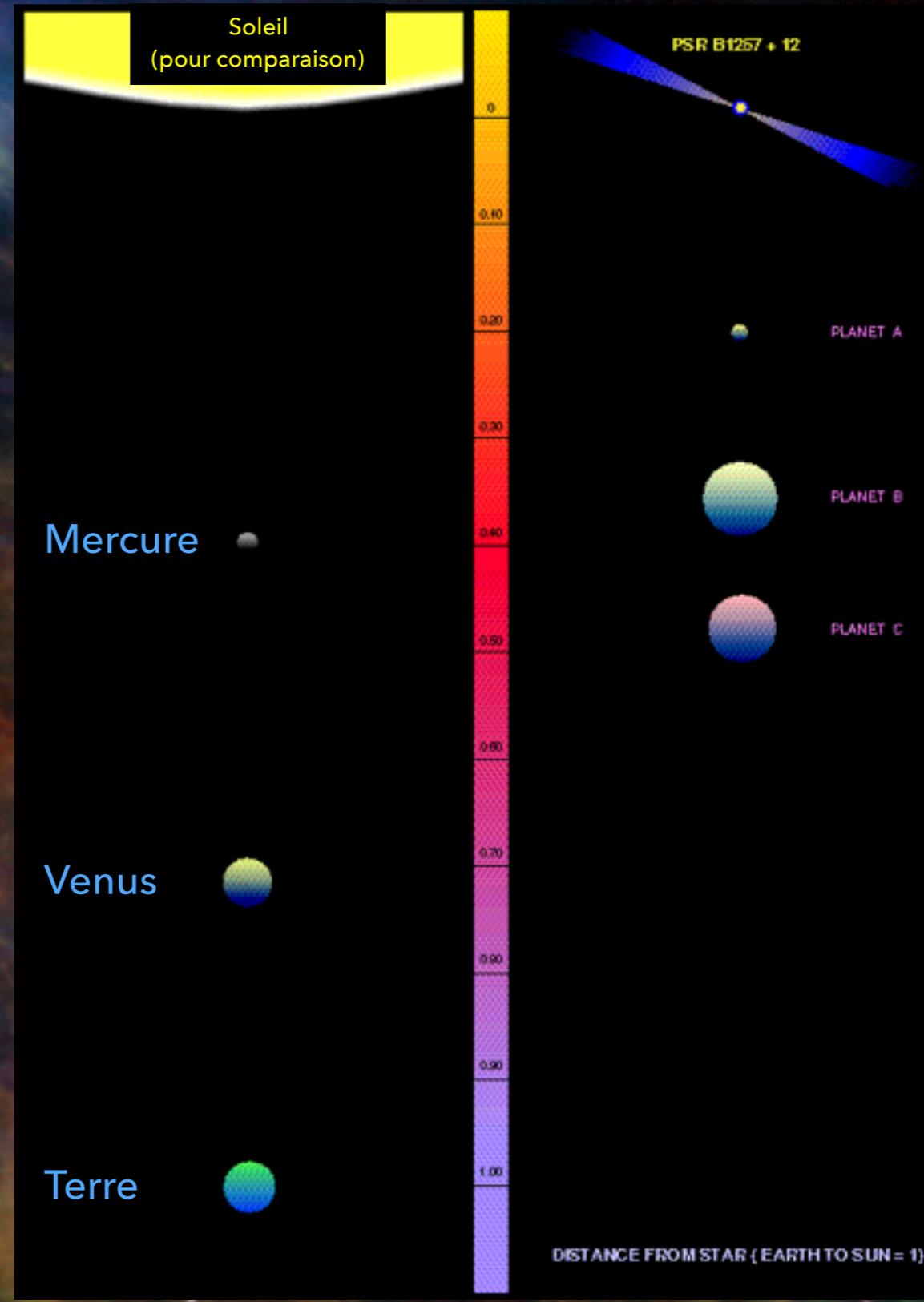
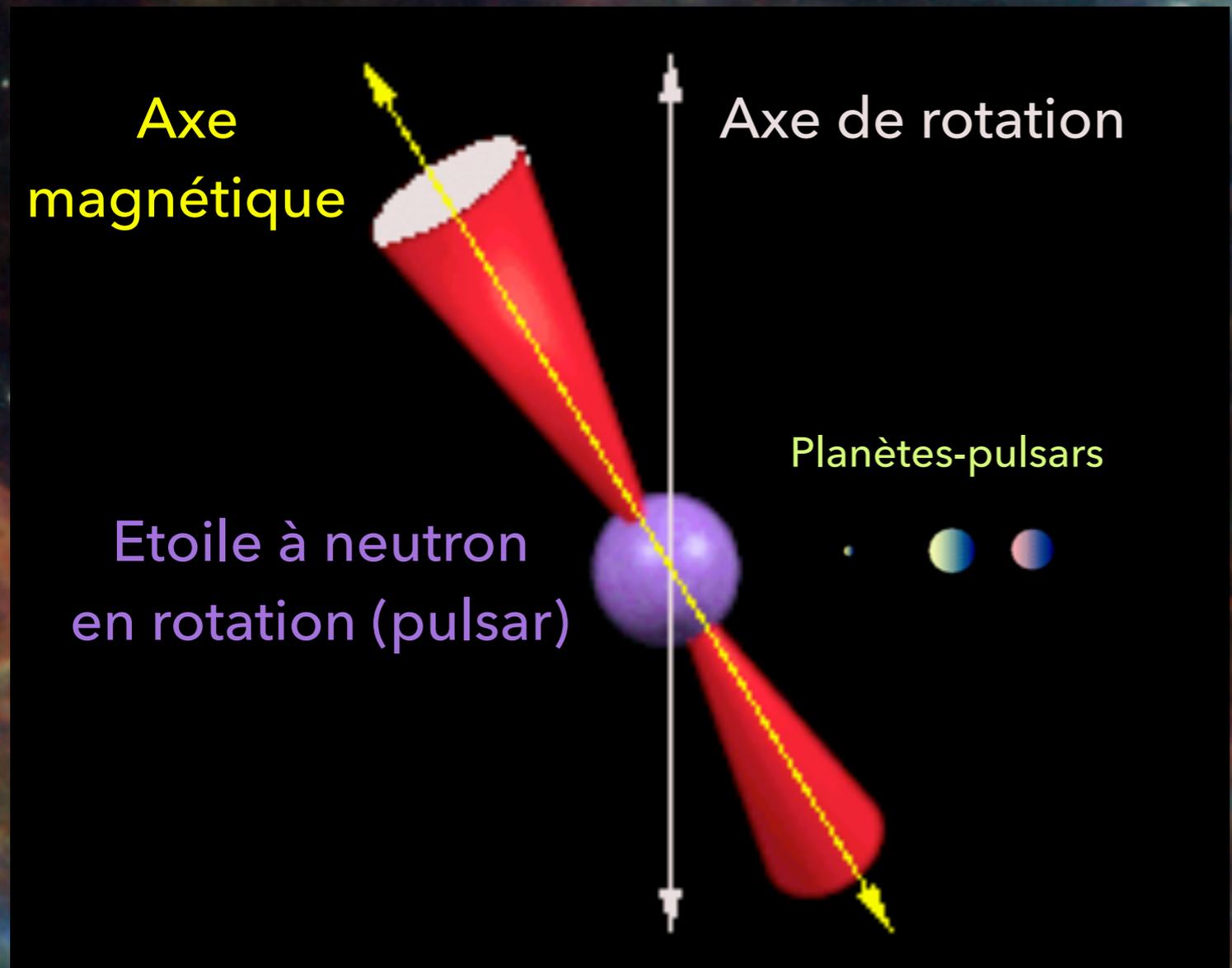
\* National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, Arecibo, Puerto Rico 00613, USA

† National Radio Astronomy Observatory, Socorro, New Mexico 87801, USA

**MILLISECOND** radio pulsars, which are old ( $\sim 10^9$  yr), rapidly rotating neutron stars believed to be spun up by accretion of matter from their stellar companions, are usually found in binary systems with other degenerate stars<sup>1</sup>. Using the 305-m Arecibo radiotelescope to make precise timing measurements of pulses from the recently discovered 6.2-ms pulsar PSR1257+12 (ref. 2), we demonstrate that, rather than being associated with a stellar object, the pulsar is orbited by two or more planet-sized bodies. The planets detected so far have masses of at least  $2.8 M_{\oplus}$  and  $3.4 M_{\oplus}$ , where  $M_{\oplus}$  is the mass of the Earth. Their respective distances from the pulsar are 0.47 AU and 0.36 AU, and they move in almost circular orbits with periods of 98.2 and 66.6 days. Observations indicate

# ... des découvertes, enfin !

## Détection par chronométrage de pulsars



– Origine des ces planètes ?

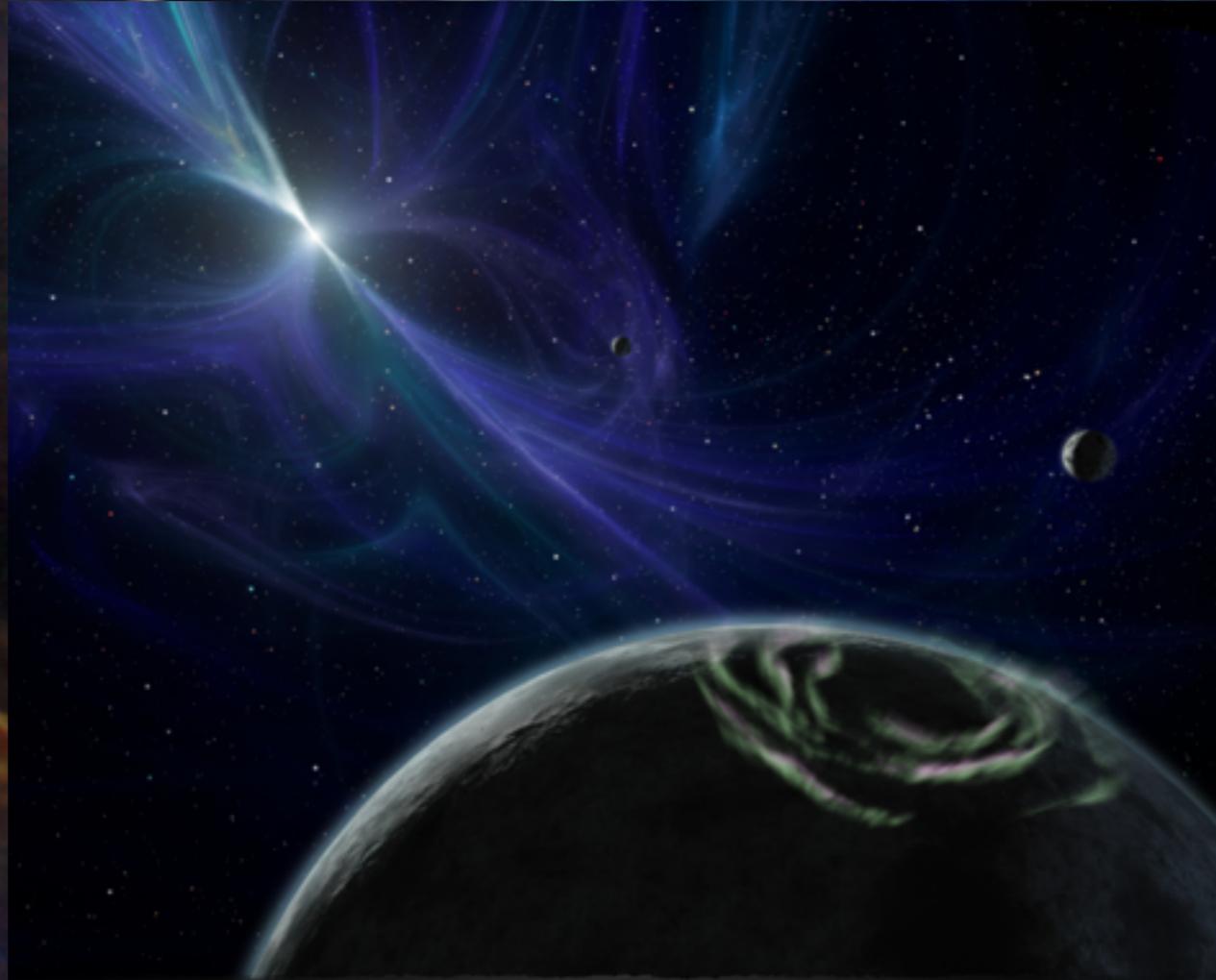
*... des découvertes, enfin !*



Radiotélescope d'Arecibo (Puerto Rico) – 305m de diamètre

*... des découvertes, enfin !*

## Détection par chronométrage de pulsars



- Peu d'exoplanètes découvertes par cette méthode :
  - 2 systèmes planétaires pulsar confirmés
  - Une poignée de cas indéterminés
- Les planètes existent autour d'étoiles à tous les stades de leur vie

... des découvertes, enfin !

1995 : Un Jupiter chaud !  
51 Pegase b

NATURE · VOL 378 · 23 NOVEMBER 1995

## **A Jupiter-mass companion to a solar-type star**

**Michel Mayor & Didier Queloz**

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

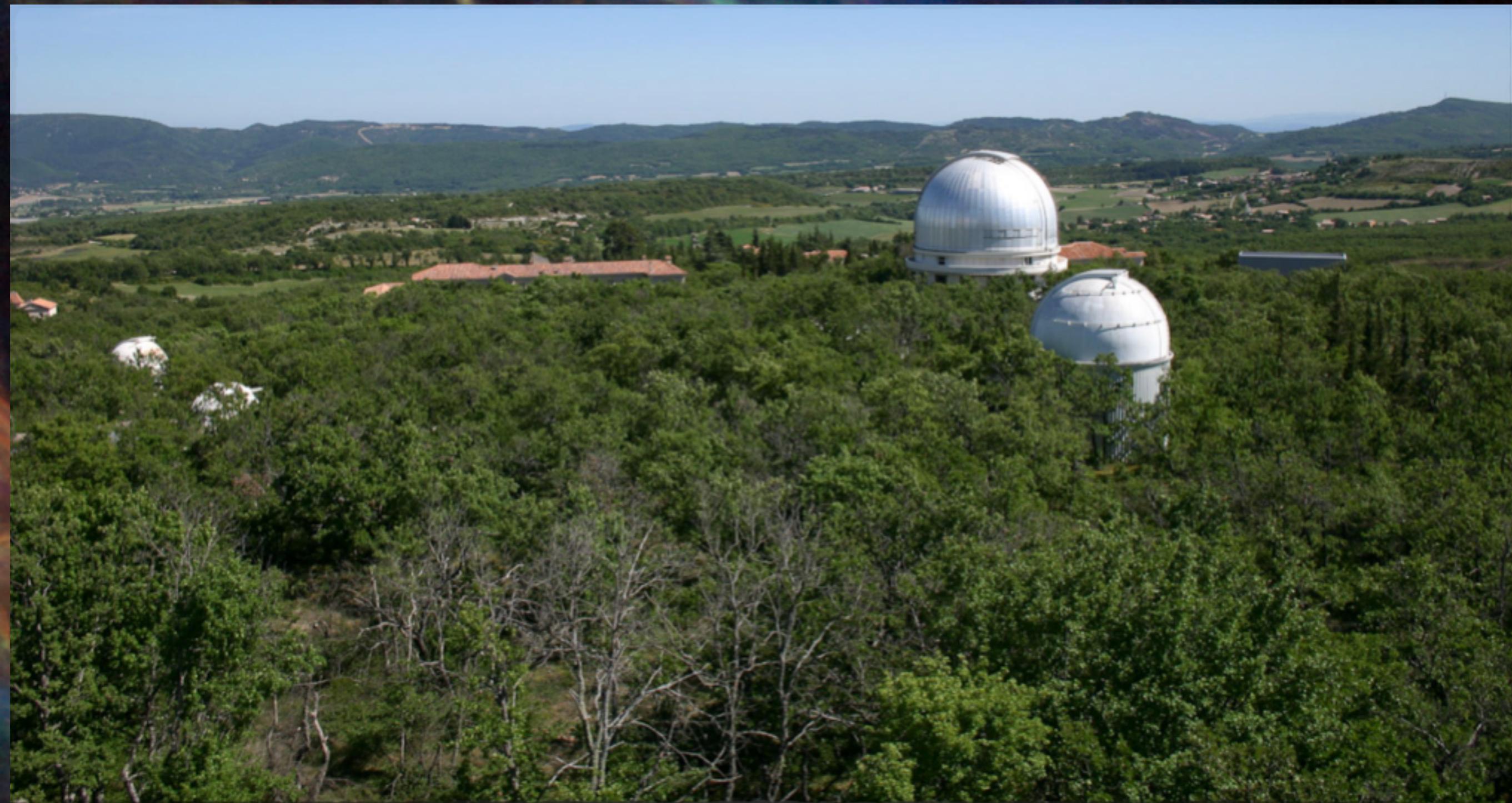
---

**The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.**

---

*... des découvertes, enfin !*

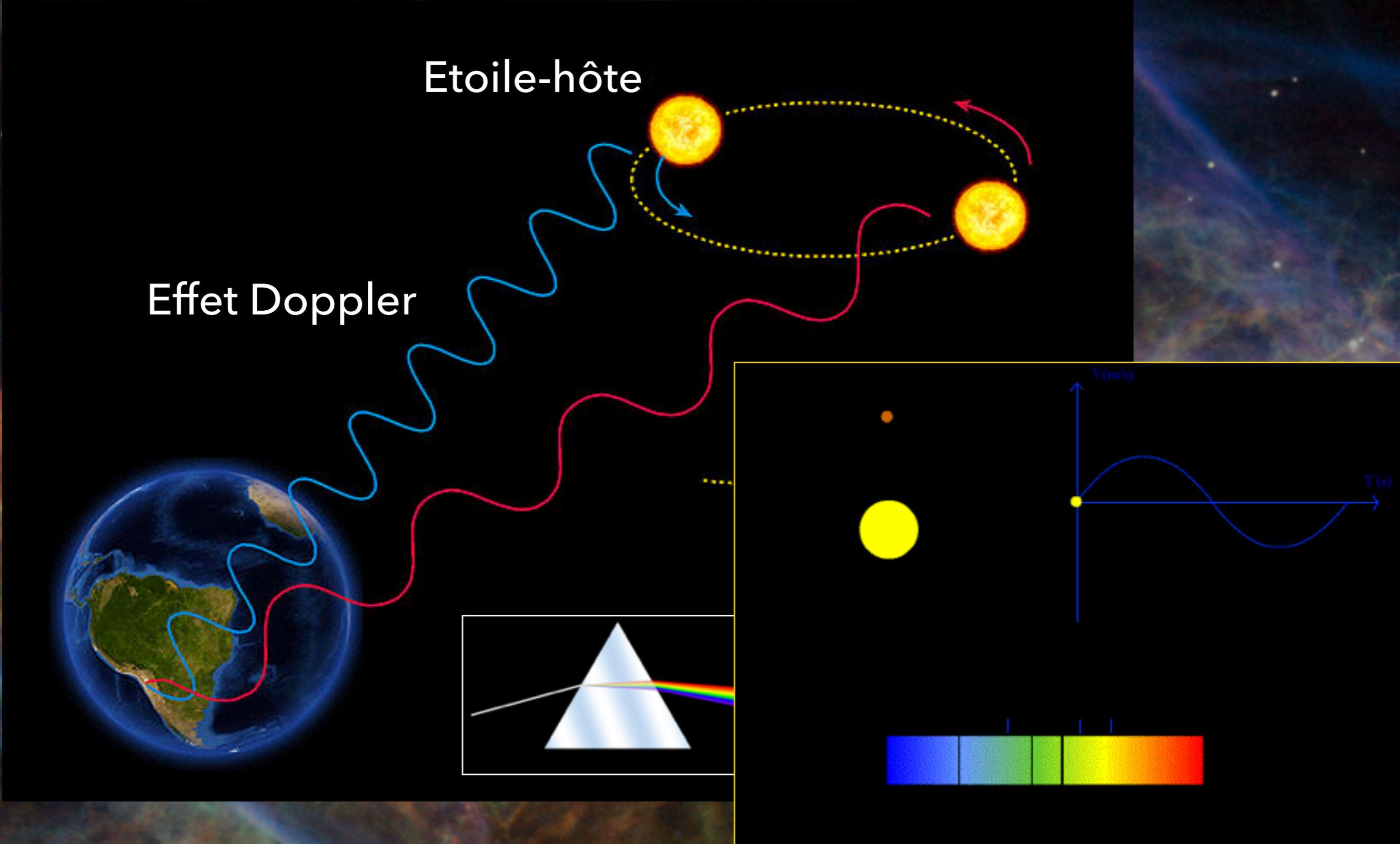
Détection de 51 Pégase b



Le télescope qui a permis la découverte, à l'Observatoire de Haute-Provence

# ... des découvertes, enfin !

## Détection par vitesse radiale (effet Doppler)

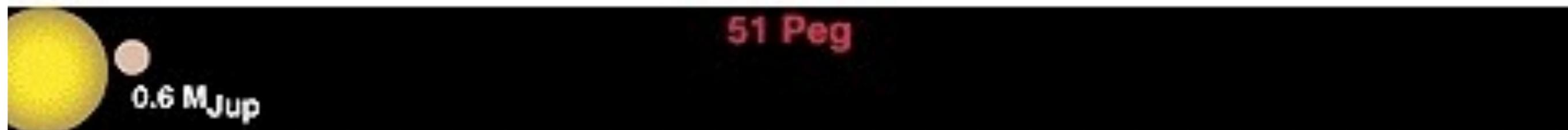


... des découvertes, enfin !

## Détection de 51 Pégase b : le premier Jupiter chaud



- Une planète géante : 1/2 Jupiter
- Période de révolution... **4,2 jours** !  
(contre **12 ans** pour Jupiter)
- Comment une telle planète s'est-elle formée, ou comment est-elle arrivée là ?



... des découvertes, enfin !

2000: Le premier transit d'une exoplanète devant son étoile  
**HD 209458**

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 529:L45–L48, 2000

DETECTION OF PLANETARY TRANSITS ACROSS A SUN-LIKE STAR

DAVID CHARBONNEAU,<sup>1,2</sup> TIMOTHY M. BROWN,<sup>2</sup> DAVID W. LATHAM,<sup>1</sup> AND MICHEL MAYOR<sup>3</sup>

*Received 1999 November 19; accepted 1999 November 23; published 1999 December 16*

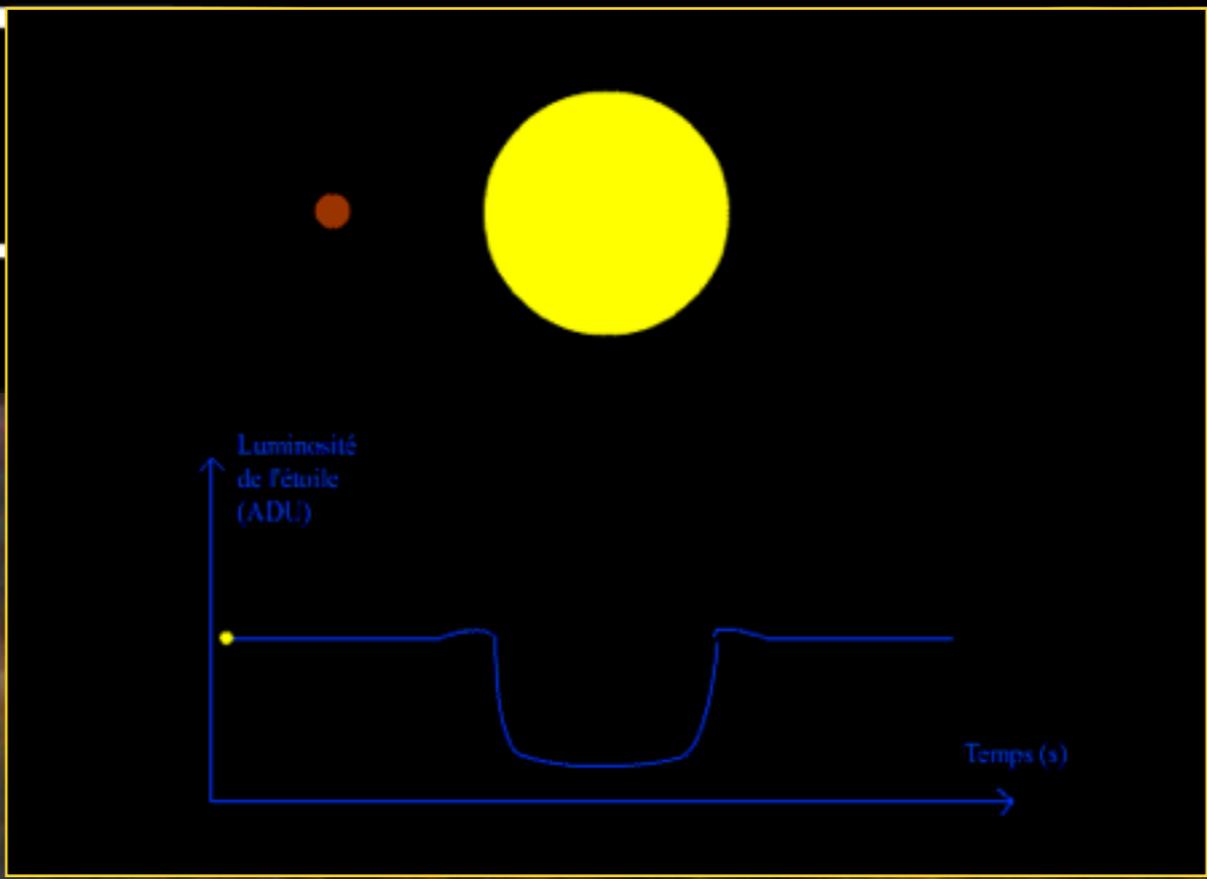
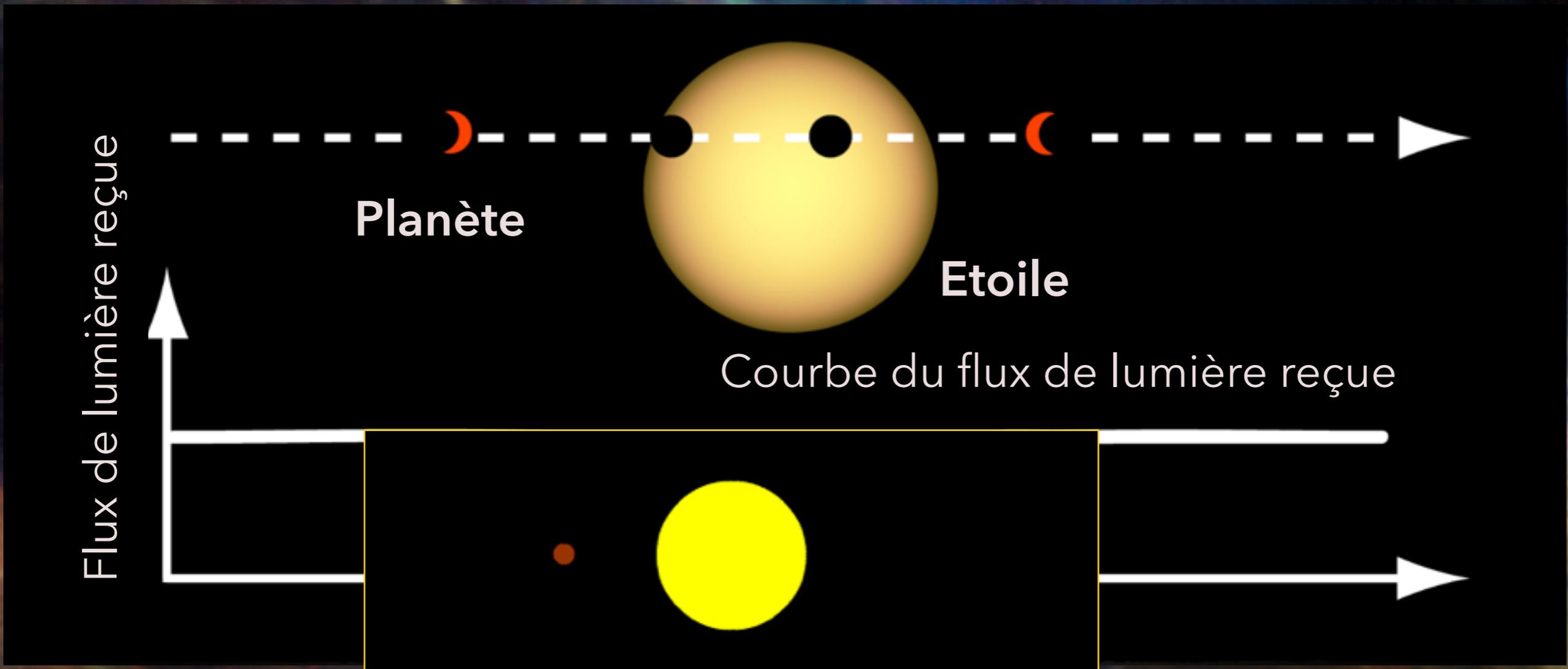
ABSTRACT

We report high-precision, high-cadence photometric measurements of the star HD 209458, which is known from radial velocity measurements to have a planetary-mass companion in a close orbit. We detect two separate transit events at times that are consistent with the radial velocity measurements. In both cases, the detailed shape of the transit curve due to both the limb darkening of the star and the finite size of the planet is clearly evident. Assuming stellar parameters of  $1.1 R_{\odot}$  and  $1.1 M_{\odot}$ , we find that the data are best interpreted as a gas giant with a radius of  $1.27 \pm 0.02 R_{\text{Jup}}$  in an orbit with an inclination of  $87.1 \pm 0.2$ . We present values for the planetary

Nota Bene : cette planète était déjà détectée par vitesse radiale, en tant que Jupiter chaud

# ... des découvertes, enfin !

## Détection par transit



# ... des découvertes, enfin !

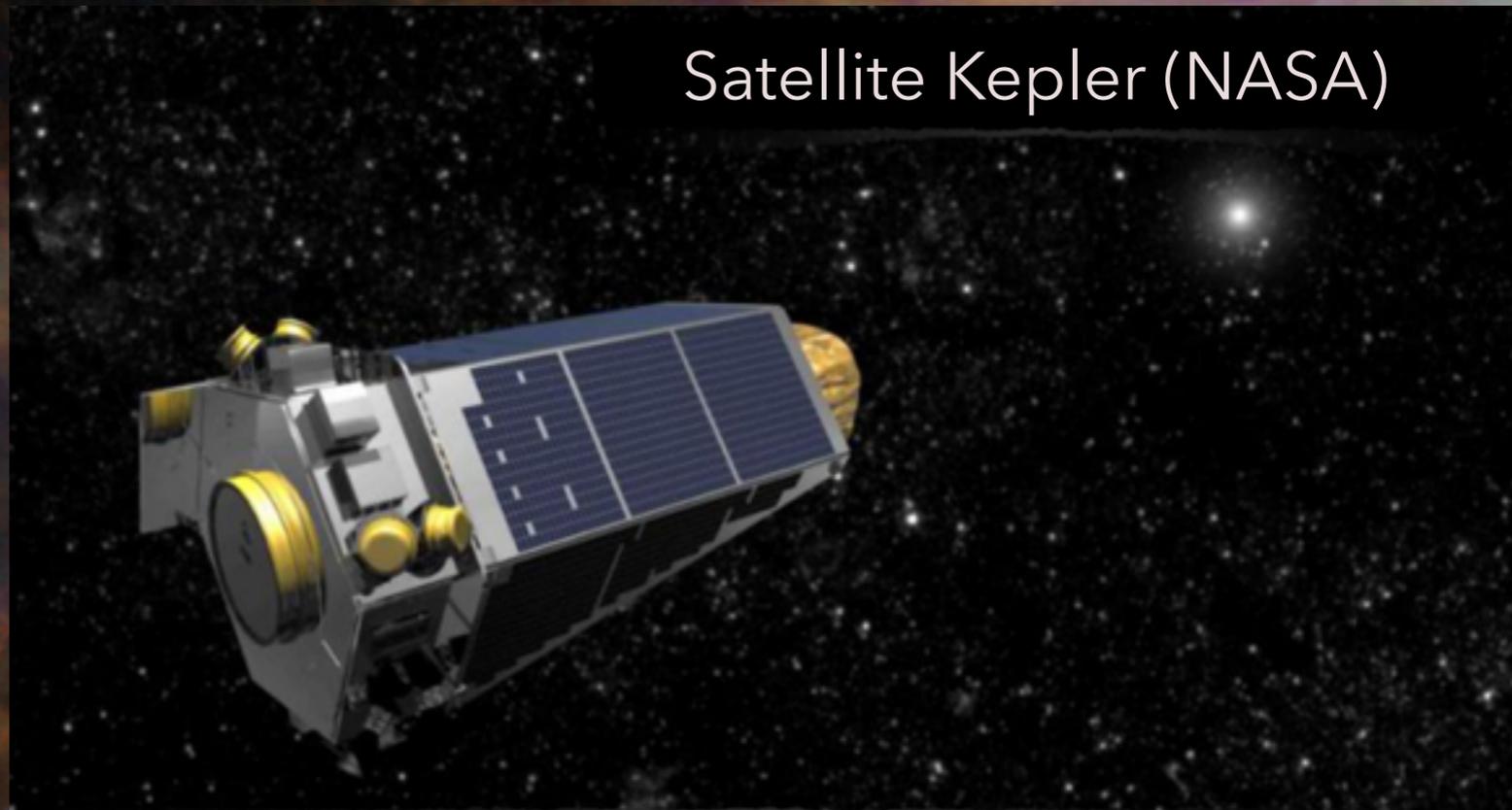
Projet sol WASP (GB)



Satellite CoRoT (CNES/ESA)



Satellite Kepler (NASA)



... des découvertes, enfin !

2004 : La première image d'une exoplanète  
**2M 1207-39 b**

A&A 425, L29–L32 (2004)

## A giant planet candidate near a young brown dwarf<sup>★</sup>

### Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing

G. Chauvin<sup>1</sup>, A.-M. Lagrange<sup>2</sup>, C. Dumas<sup>1</sup>, B. Zuckerman<sup>3</sup>, D. Mouillet<sup>4</sup>, I. Song<sup>3</sup>,  
J.-L. Beuzit<sup>2</sup>, and P. Lowrance<sup>5</sup>

<sup>1</sup> European Southern Observatory, Casilla 19001, Santiago 19, Chile  
e-mail: gchauvin@eso.org

<sup>2</sup> Laboratoire d'Astrophysique, Observatoire de Grenoble, 414 rue de la piscine, Saint-Martin d'Hères, France

<sup>3</sup> Department of Physics & Astronomy and Center for Astrobiology, University of California, Los Angeles,  
8371 Math Science Building, Box 951562, CA 90095-1562, USA

<sup>4</sup> Laboratoire d'Astrophysique, Observatoire Midi-Pyrénées, Tarbes, France

<sup>5</sup> Spitzer Science Center, Infrared Processing and Analysis Center, MS 220-6, Pasadena, CA 91125, USA

Received 22 July 2004 / Accepted 12 August 2004

**Abstract.** We present deep VLT/NACO infrared imaging and spectroscopic observations of the brown dwarf 2MASSWJ 1207334–393254, obtained during our on-going adaptive optics survey of southern young, nearby associations. This  $\sim 25 M_{\text{Jup}}$  brown dwarf, located  $\sim 70$  pc from Earth, has been recently identified as a member of the TW Hydrae Association (age  $\sim 8$  Myr). Using adaptive optics infrared wavefront sensing to acquire sharp images of its circumstellar environment, we discovered a very faint and very red object at a close separation of  $\sim 780$  mas ( $\sim 55$  AU). Photometry in the  $H$ ,  $K_s$ , and  $L'$  bands

*... des découvertes, enfin !*

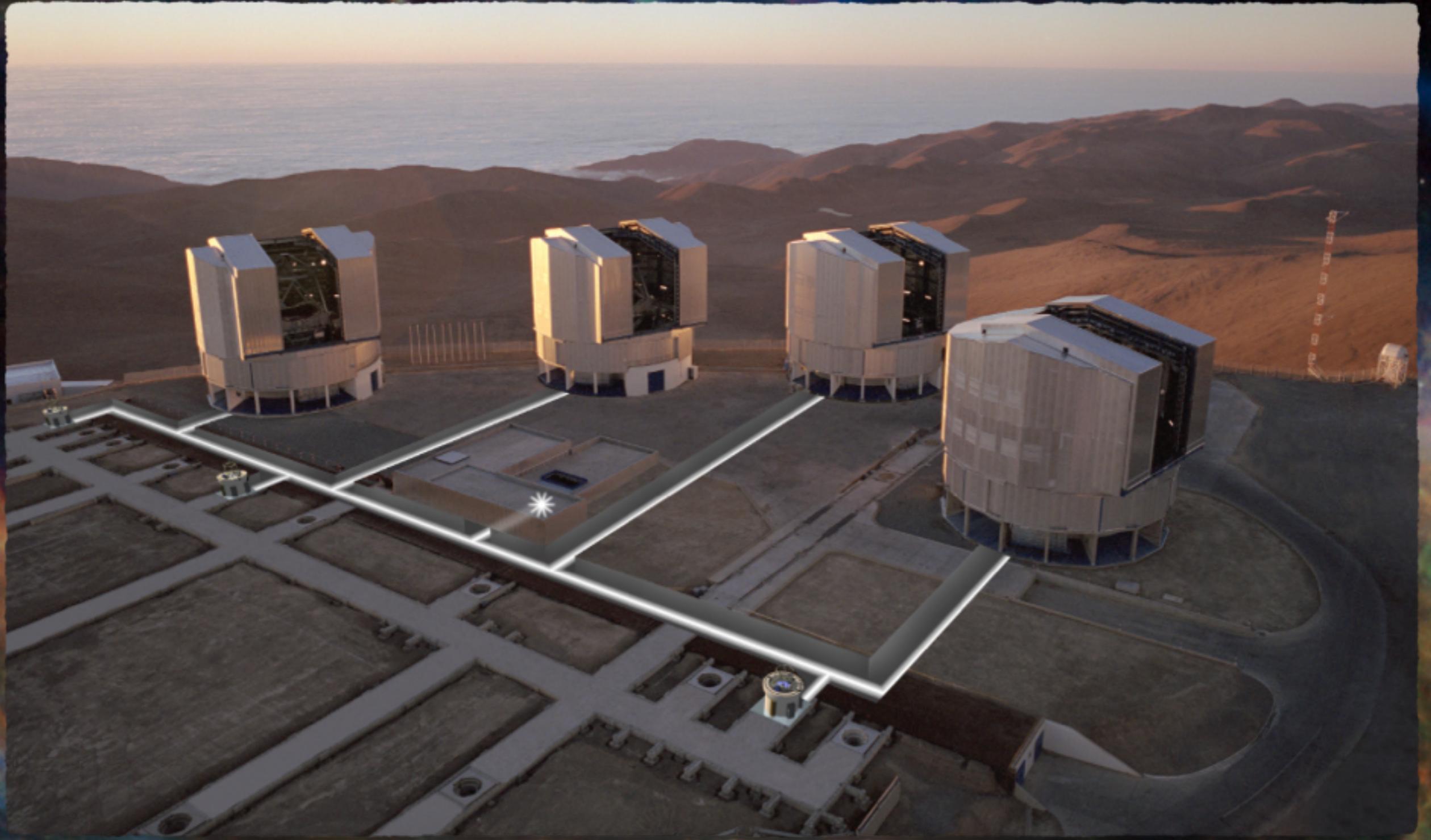
Détection de 2M 1207-39 b



- Cette planète est en orbite autour d'une naine brune, une étoile ratée !
- Elle est située très loin de sa naine brune, à 55 fois la distance Terre-Soleil !

*... des découvertes, enfin !*

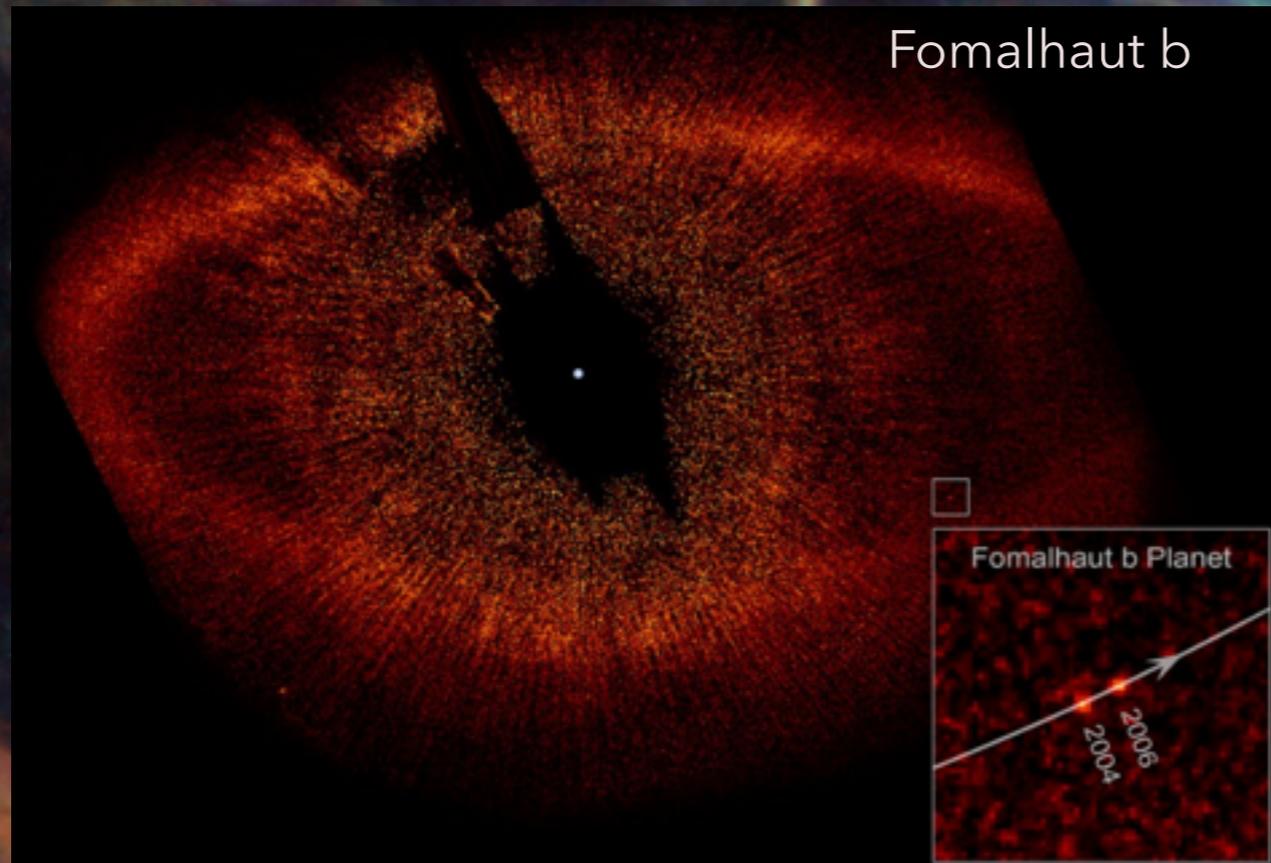
Détection par imagerie directe



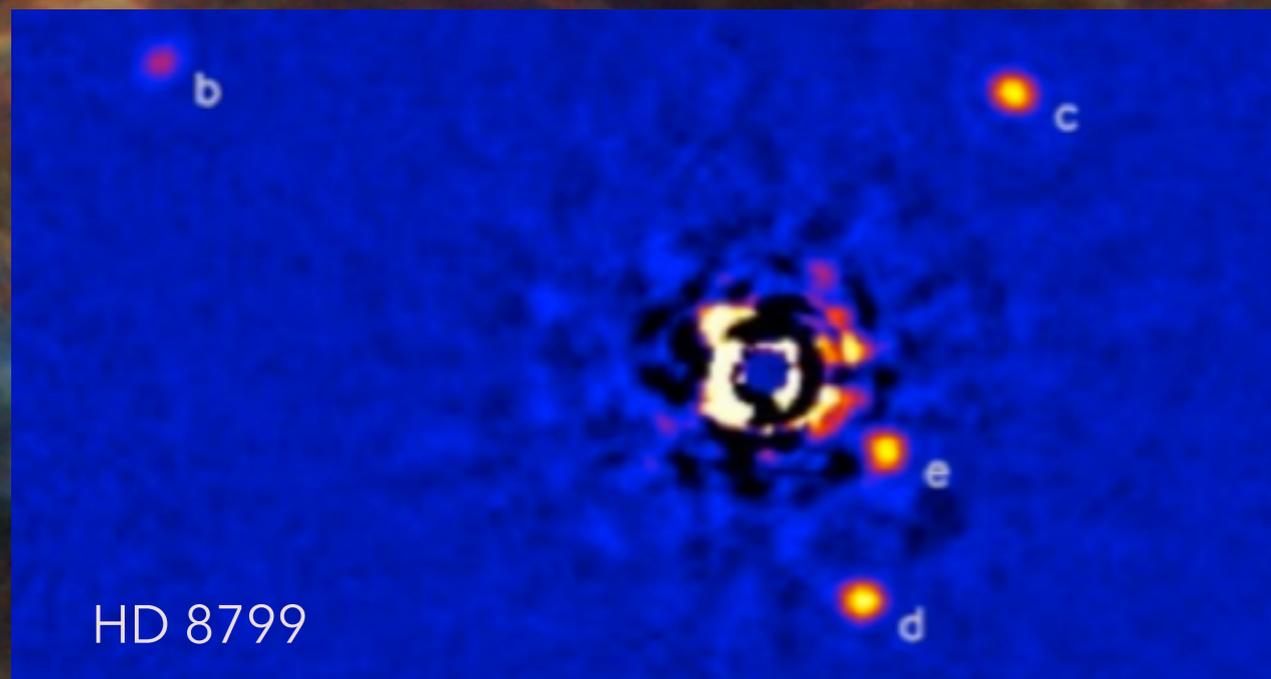
Le Very Large Telescope, au Chili, qui permet de faire l'image d'exoplanètes

# ... des découvertes, enfin !

## Détection par imagerie directe



- Planète plusieurs fois controversée :
  - Difficulté de séparer la luminosité planétaire du bruit
  - Plusieurs sources de confusion : collisions d'astéroïdes...
- Exoplanète autour d'une étoile populaire !



- 4 planètes dans le système !
- L'étoile centrale est presque complètement « annulée » grâce aux techniques interférométriques

... des découvertes, enfin !

2006 : La première super-Terre glacée  
**OGLE-2005-BLG-390Lb**

NATURE | Vol 439 | 26 January 2006

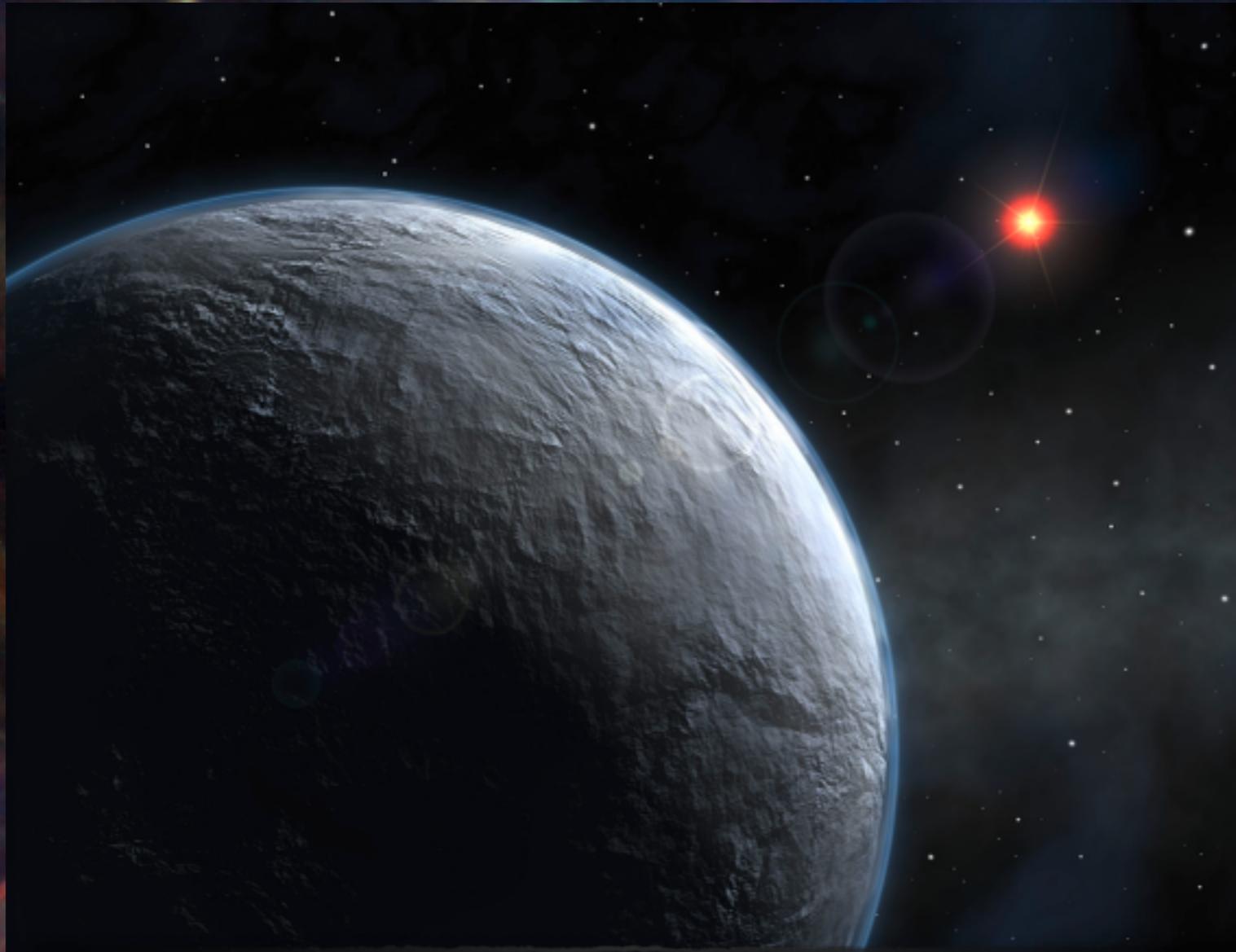
## Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing

J.-P. Beaulieu<sup>1,4</sup>, D. P. Bennett<sup>1,3,5</sup>, P. Fouqué<sup>1,6</sup>, A. Williams<sup>1,7</sup>, M. Dominik<sup>1,8</sup>, U. G. Jørgensen<sup>1,9</sup>, D. Kubas<sup>1,10</sup>, A. Cassan<sup>1,4</sup>, C. Coutures<sup>1,11</sup>, J. Greenhill<sup>1,12</sup>, K. Hill<sup>1,12</sup>, J. Menzies<sup>1,13</sup>, P. D. Sackett<sup>1,14</sup>, M. Albrow<sup>1,15</sup>, S. Brilliant<sup>1,10</sup>, J. A. R. Caldwell<sup>1,16</sup>, J. J. Calitz<sup>1,17</sup>, K. H. Cook<sup>1,18</sup>, E. Corrales<sup>1,4</sup>, M. Desort<sup>1,4</sup>, S. Dieters<sup>1,12</sup>, D. Dominis<sup>1,19</sup>, J. Donatowicz<sup>1,20</sup>, M. Hoffman<sup>1,19</sup>, S. Kane<sup>1,21</sup>, J.-B. Marquette<sup>1,4</sup>, R. Martin<sup>1,7</sup>, P. Meintjes<sup>1,17</sup>, K. Pollard<sup>1,15</sup>, K. Sahu<sup>1,22</sup>, C. Vinter<sup>1,9</sup>, J. Wambsganss<sup>1,23</sup>, K. Woller<sup>1,9</sup>, K. Horne<sup>1,8</sup>, I. Steele<sup>1,24</sup>, D. M. Bramich<sup>1,8,24</sup>, M. Burgdorf<sup>1,24</sup>, C. Snodgrass<sup>1,25</sup>, M. Bode<sup>1,24</sup>, A. Udalski<sup>2,26</sup>, M. K. Szymański<sup>2,26</sup>, M. Kubiak<sup>2,26</sup>, T. Więckowski<sup>2,26</sup>, G. Pietrzyński<sup>2,26,27</sup>, I. Soszyński<sup>2,26,27</sup>, O. Szewczyk<sup>2,26</sup>, Ł. Wyrzykowski<sup>2,26,28</sup>, B. Paczyński<sup>2,29</sup>, F. Abe<sup>3,30</sup>, I. A. Bond<sup>3,31</sup>, T. R. Britton<sup>3,15,32</sup>, A. C. Gilmore<sup>3,15</sup>, J. B. Hearnshaw<sup>3,15</sup>, Y. Itow<sup>3,30</sup>, K. Kamiya<sup>3,30</sup>, P. M. Kilmartin<sup>3,15</sup>, A. V. Korpela<sup>3,33</sup>, K. Masuda<sup>3,30</sup>, Y. Matsubara<sup>3,30</sup>, M. Motomura<sup>3,30</sup>, Y. Muraki<sup>3,30</sup>, S. Nakamura<sup>3,30</sup>, C. Okada<sup>3,30</sup>, K. Ohnishi<sup>3,34</sup>, N. J. Rattenbury<sup>3,28</sup>, T. Sako<sup>3,30</sup>, S. Sato<sup>3,35</sup>, M. Sasaki<sup>3,30</sup>, T. Sekiguchi<sup>3,30</sup>, D. J. Sullivan<sup>3,33</sup>, P. J. Tristram<sup>3,32</sup>, P. C. M. Yock<sup>3,32</sup> & T. Yoshioka<sup>3,30</sup>

In the favoured core-accretion model of formation of planetary systems, solid planetesimals accumulate to build up planetary cores, which then accrete nebular gas if they are sufficiently massive. Around M-dwarf stars (the most common stars in our Galaxy), this model favours the formation of Earth-mass ( $M_{\oplus}$ ) to Neptune-mass planets with orbital radii of 1 to 10 astronomical units (AU), which is consistent with the small number of gas giant planets known to orbit M-dwarf host stars<sup>1-4</sup>. More than 170 extrasolar planets have been discovered with a wide range of masses and orbital periods, but planets of Neptune's mass or less have not hitherto been detected at separations of more than 0.15 AU from normal stars. Here we report the discovery of a  $5.5^{+5.5}_{-2.7} M_{\oplus}$  planetary companion at a separation of  $2.6^{+1.5}_{-0.6}$  AU from

*... des découvertes, enfin !*

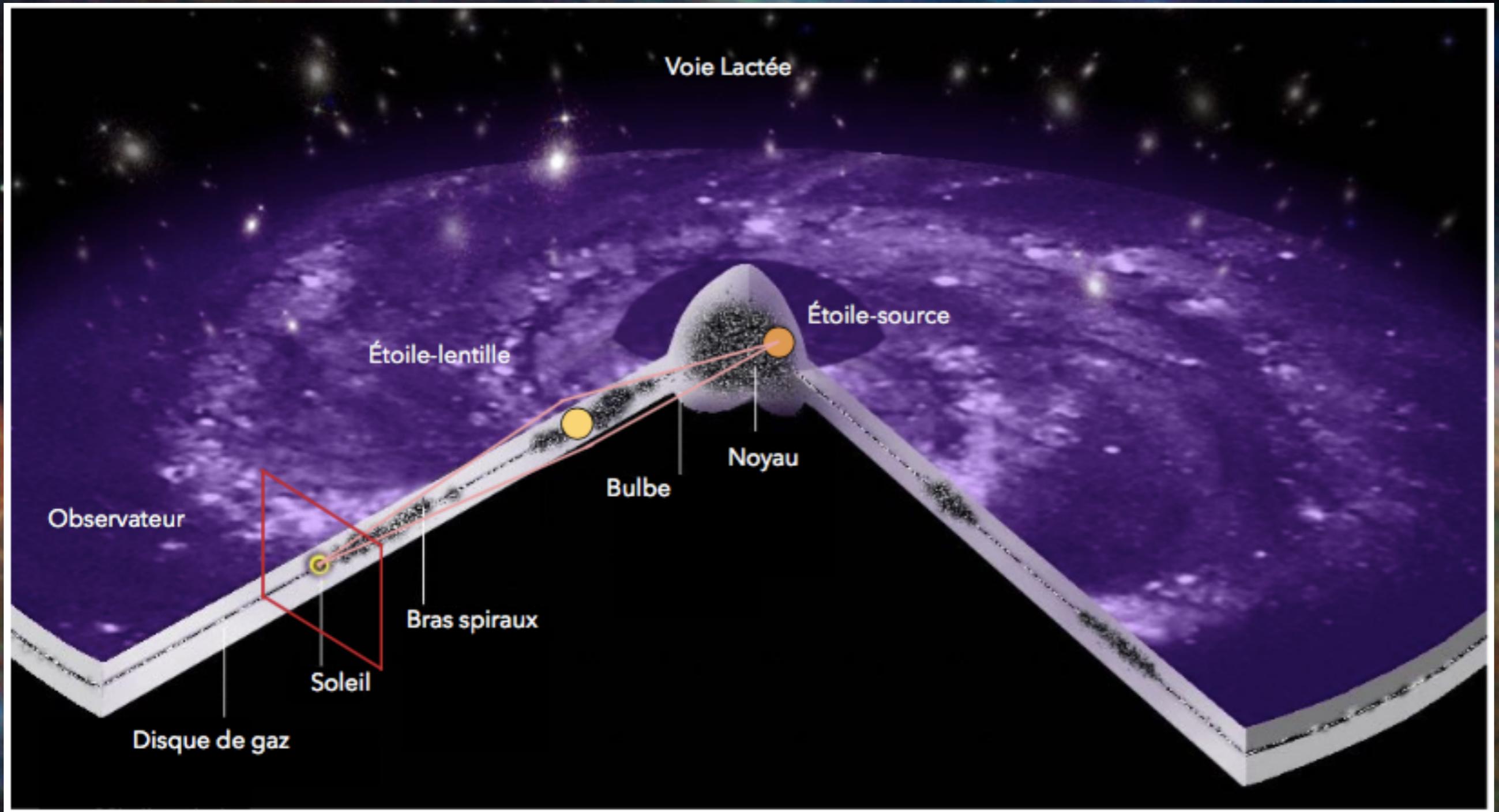
Détection de OGLE-2005-BLG-390Lb : la première super-Terre glacée



- Cette planète est située 2,4 la distance Soleil-Terre, pour une masse de 5 fois la Terre. Elle est beaucoup plus distante que les planètes détectées par les autres méthodes.
- Une nouvelle classe d'exoplanètes : les super-Terres

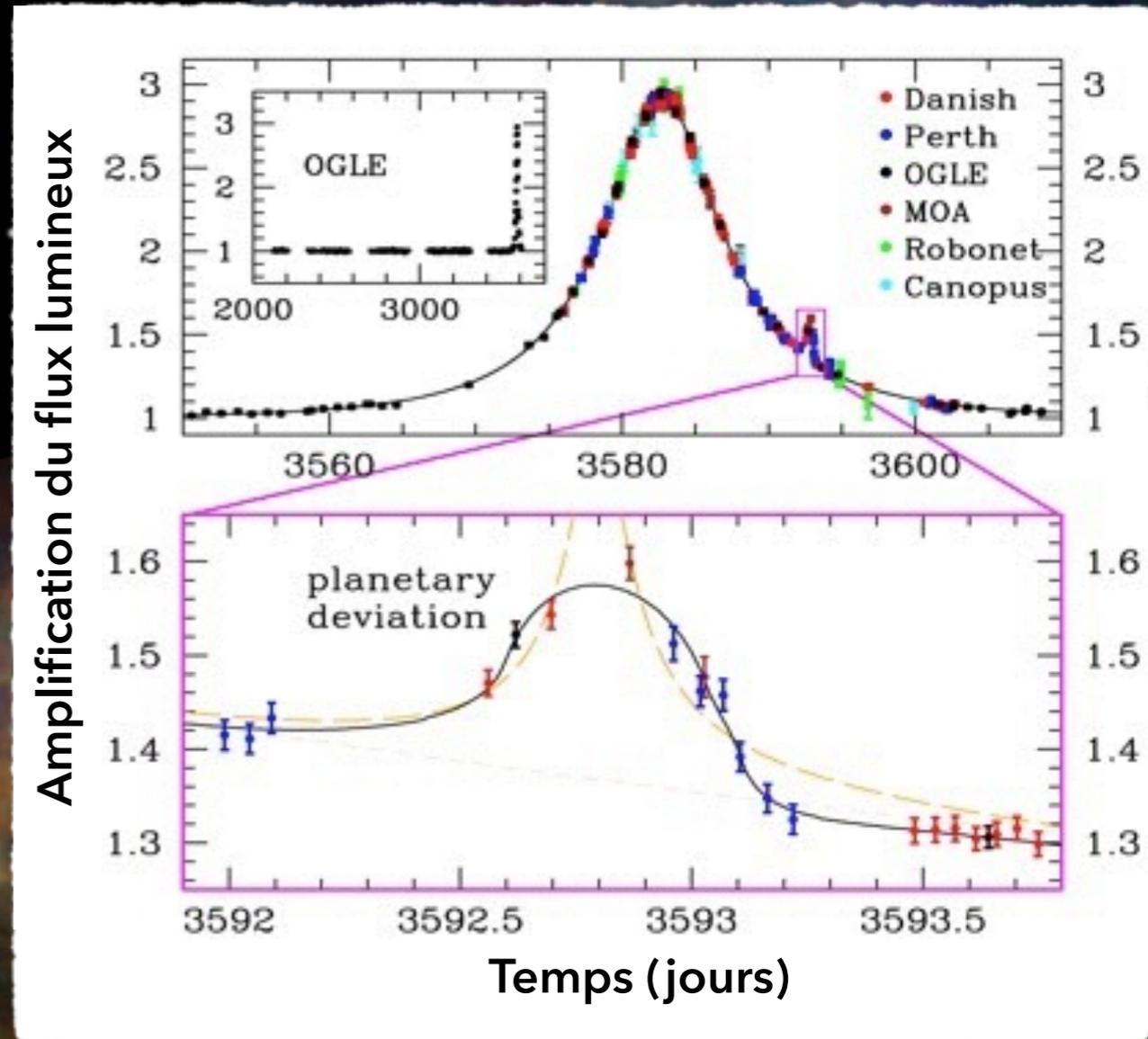
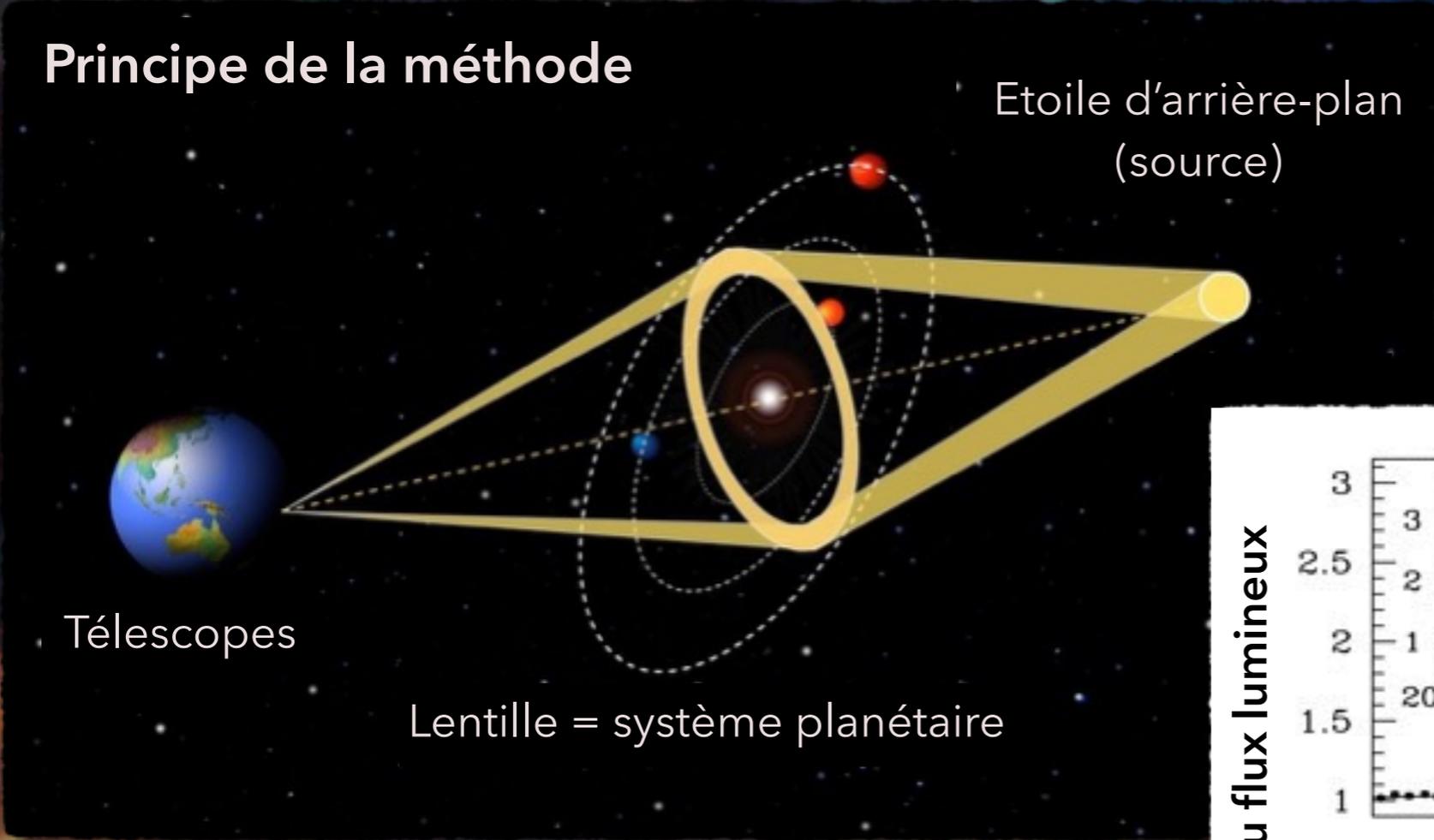
*... des découvertes, enfin !*

Détection par effet de microlentille gravitationnelle



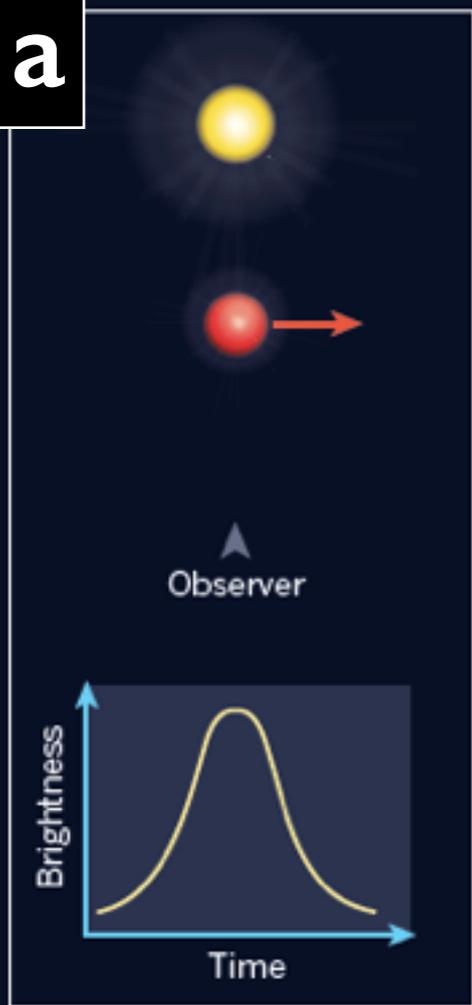
# ... des découvertes, enfin !

## Détection par effet de microlentille gravitationnelle



... des découvertes, enfin !

**a**



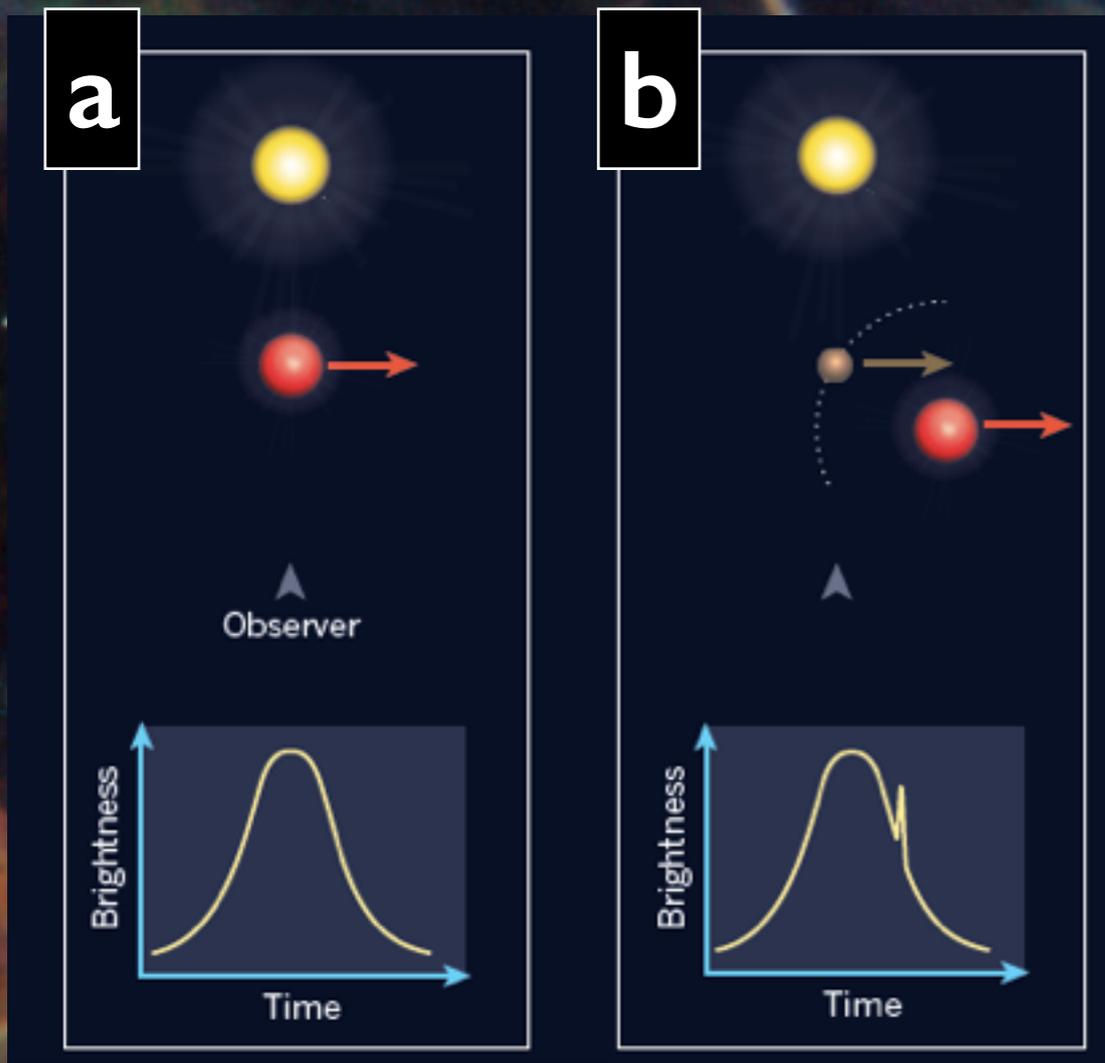
a. Etoile isolée

b. Etoile + planète

c. Etoile + planète éloignée

d. Planète isolée (ou objet de masse planétaire isolé)

... des découvertes, enfin !



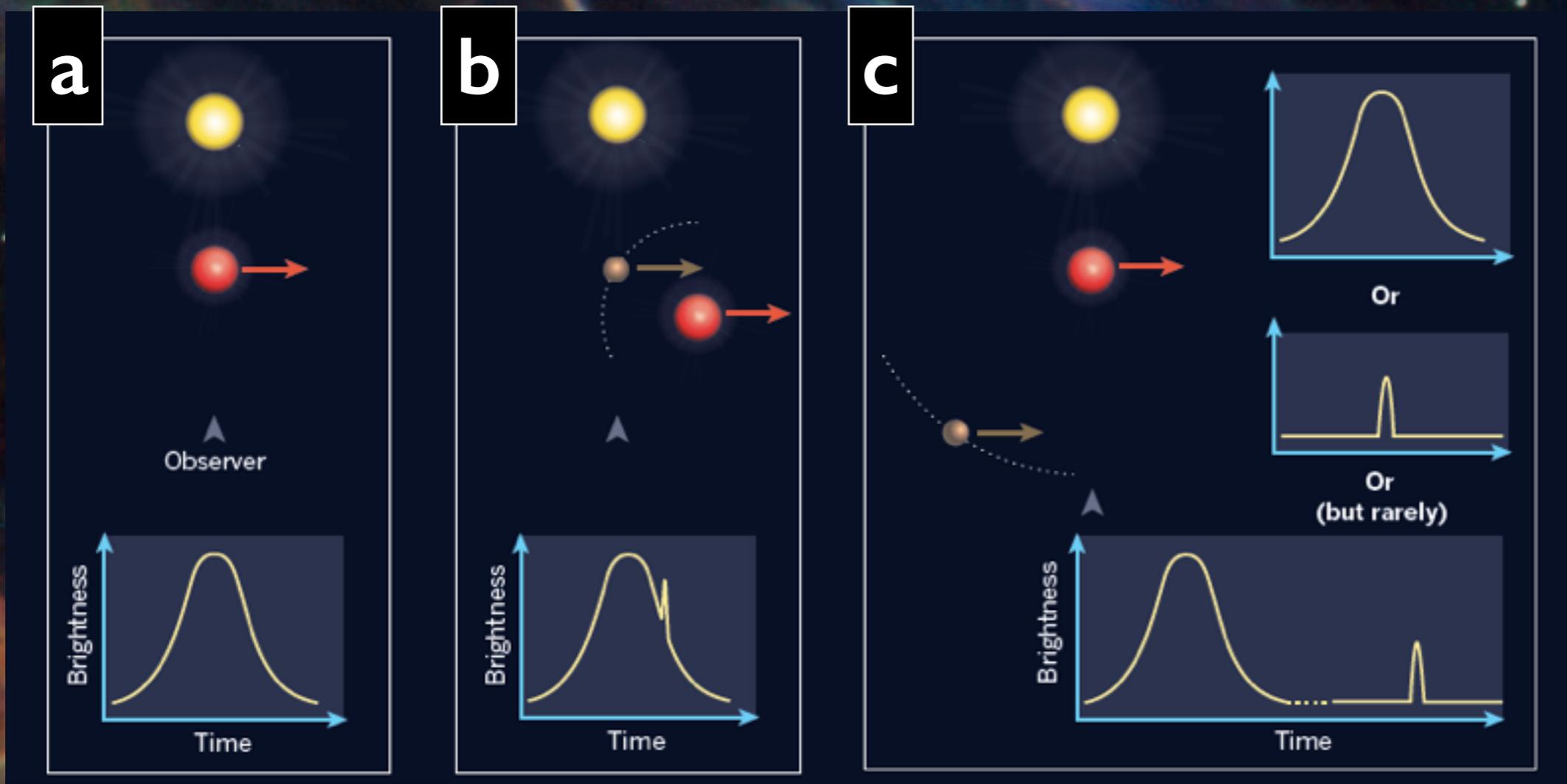
a. Etoile isolée

b. Etoile + planète

c. Etoile + planète éloignée

d. Planète isolée (ou objet de masse planétaire isolé)

# ... des découvertes, enfin !



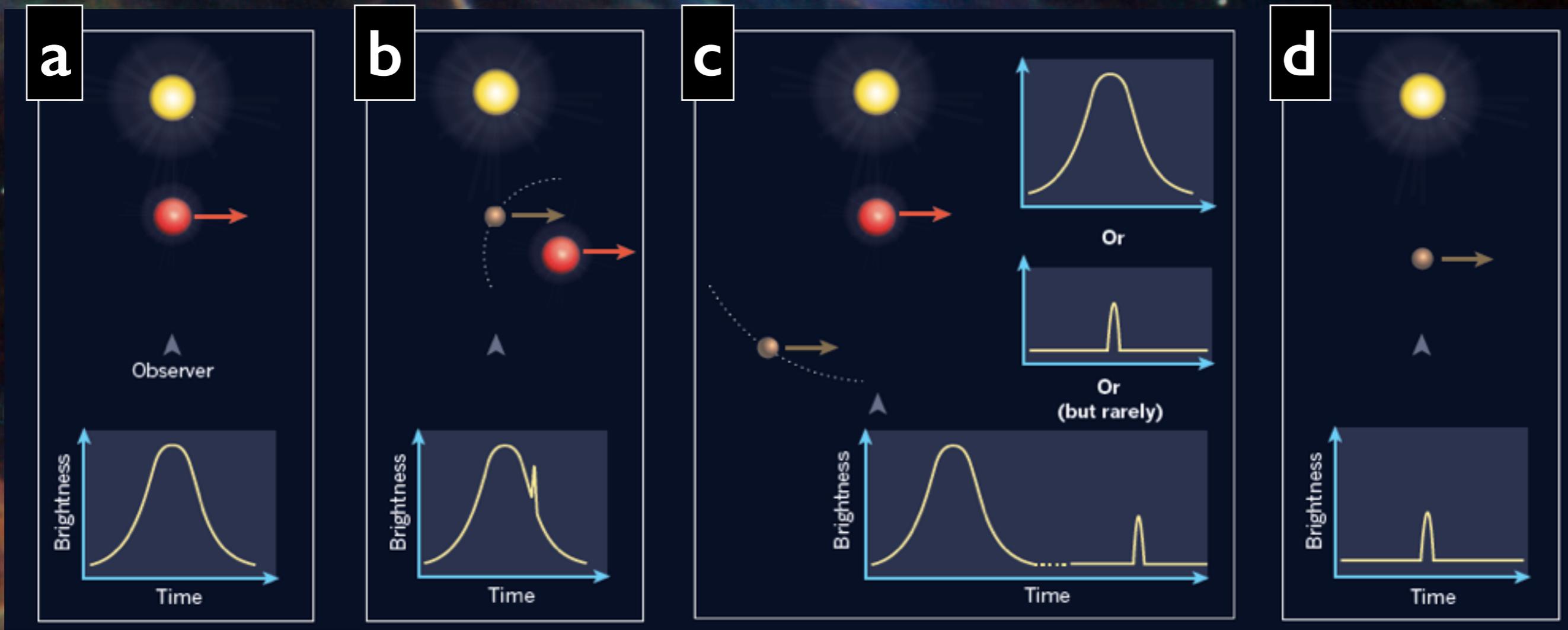
a. Etoile isolée

b. Etoile + planète

c. Etoile + planète éloignée

d. Planète isolée (ou objet de masse planétaire isolé)

# ... des découvertes, enfin !



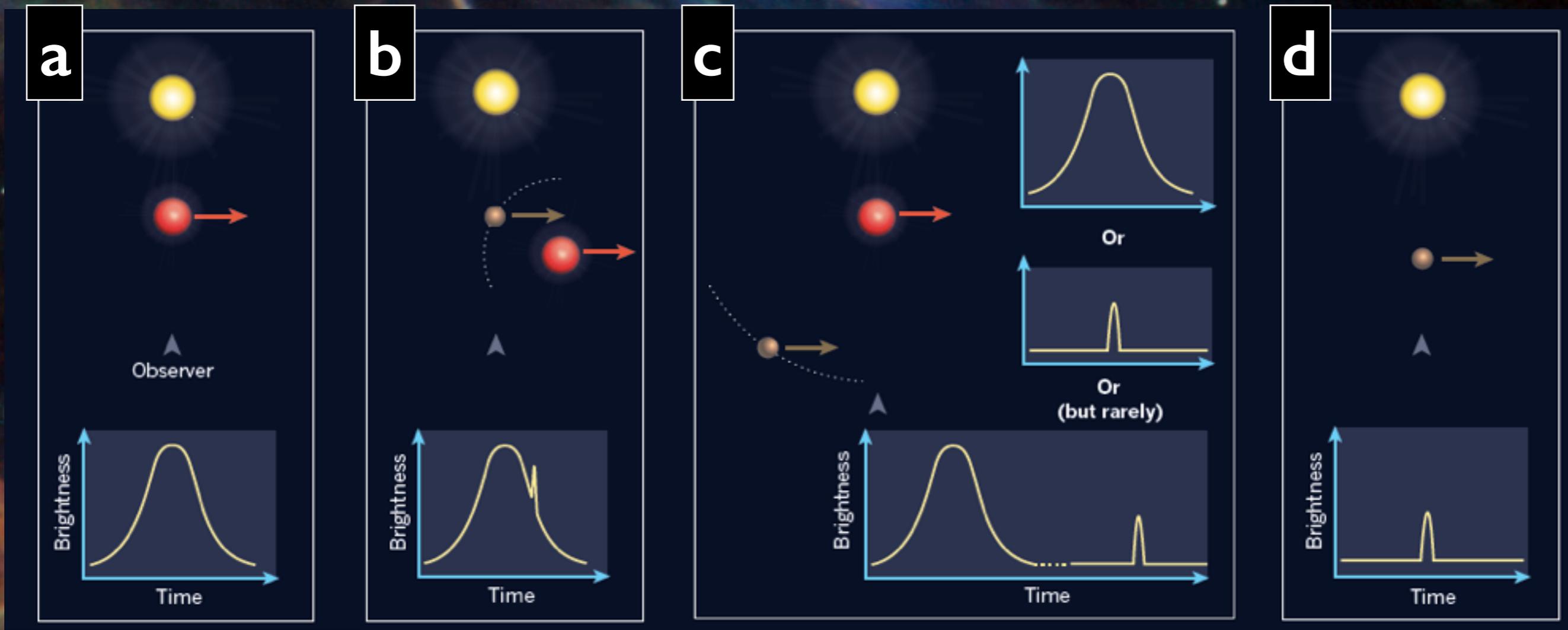
a. Etoile isolée

b. Etoile + planète

c. Etoile + planète éloignée

d. Planète isolée (ou objet de masse planétaire isolé)

... des découvertes, enfin !



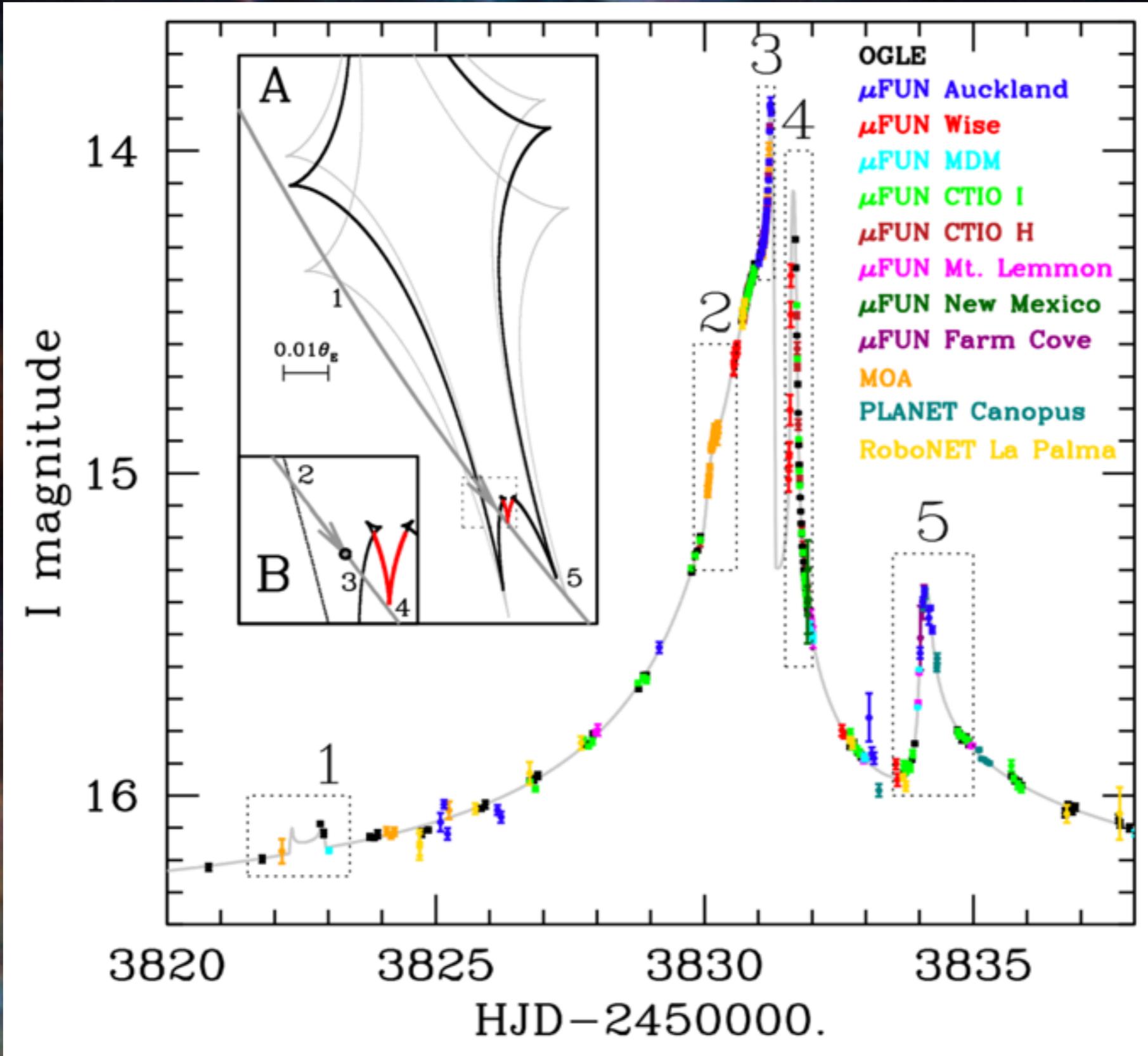
a. Etoile isolée

b. Etoile + planète

c. Etoile + planète éloignée

d. Planète isolée (ou objet de masse planétaire isolé)

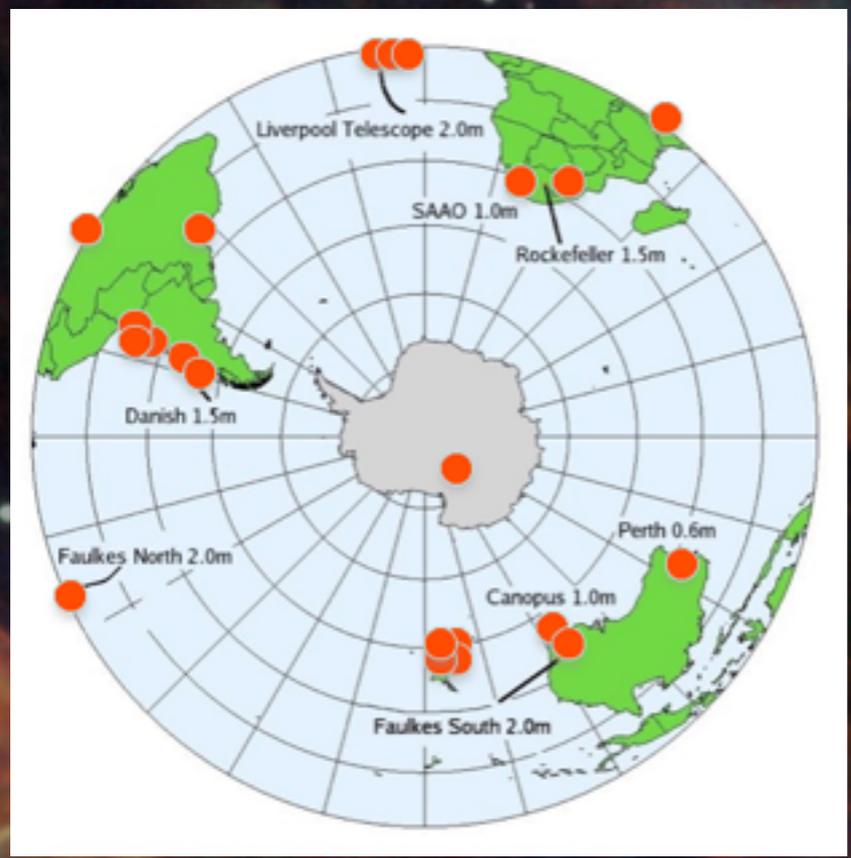
... des découvertes, enfin !



# ... des découvertes, enfin !

## Détection par effet de microlentille gravitationnelle

Des télescopes répartis autour du globe



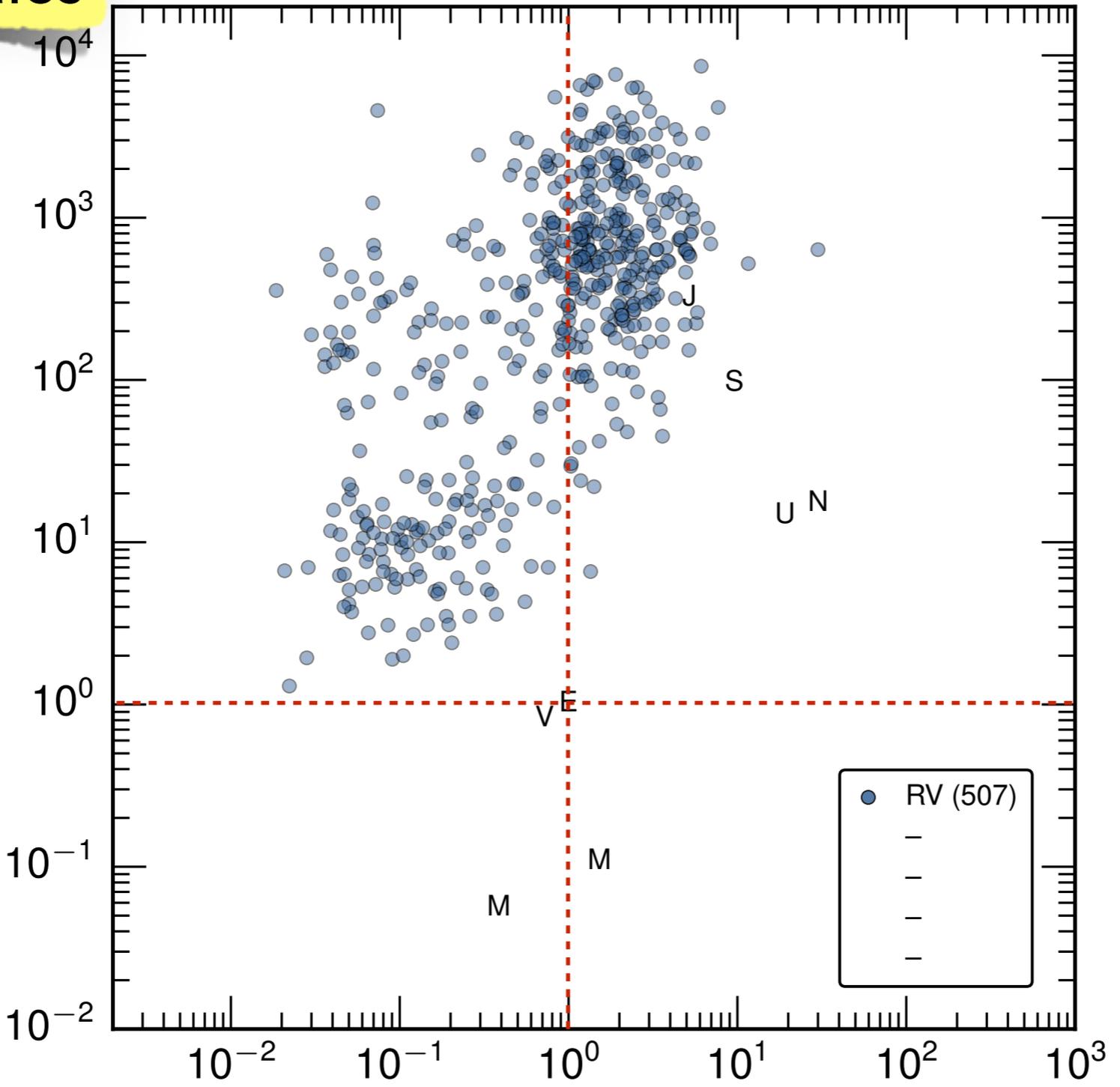
Télescopes robotisés...



# Bilan des détections

## Vitesses radiales

Masse de la planète  
(unité : Terre)



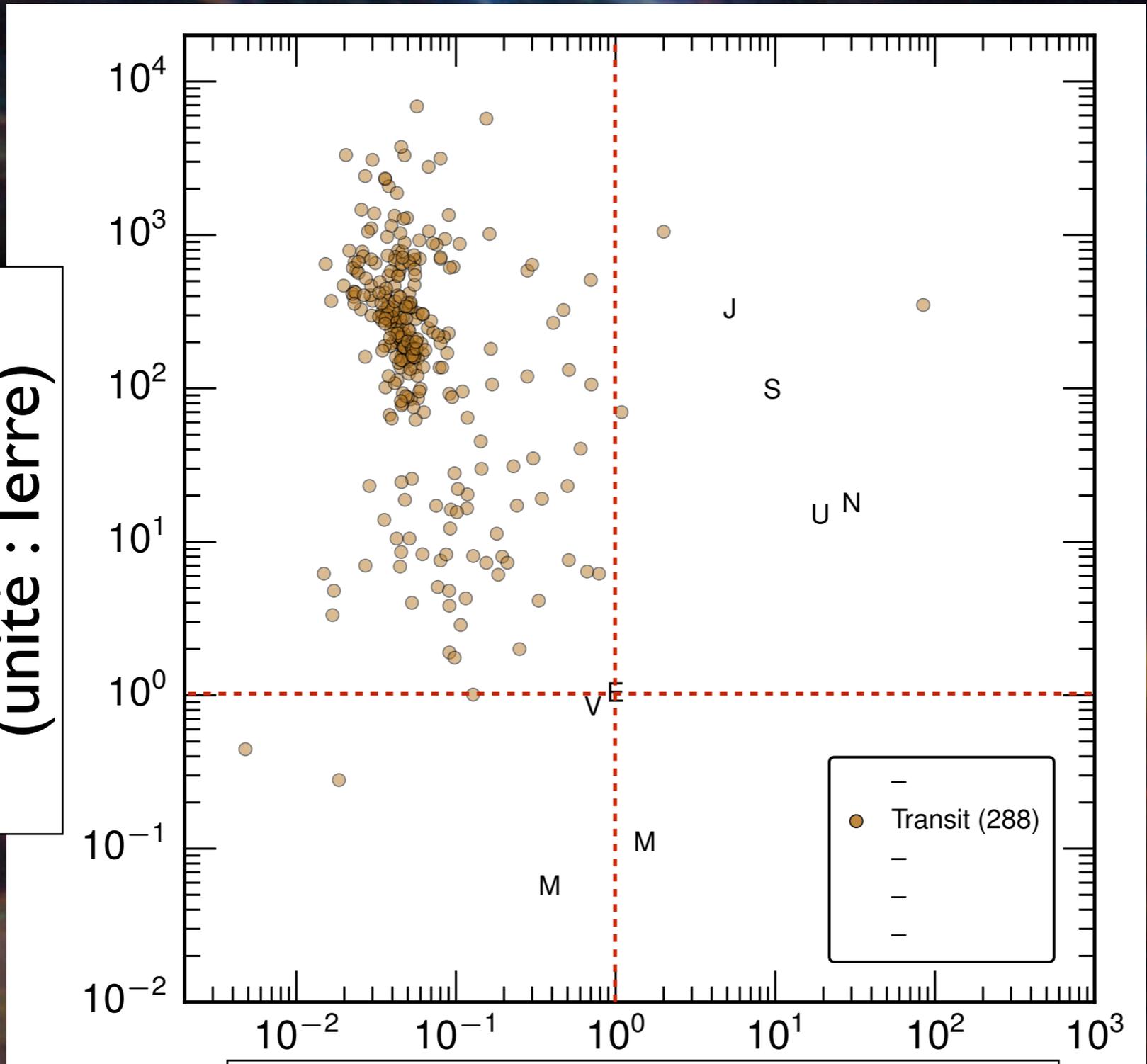
Distance planète-étoile  
(unité : distance Soleil-Terre)

La Terre est au croisement des deux traits en pointillés

# Bilan des détections

## Transits

Masse de la planète  
(unité : Terre)

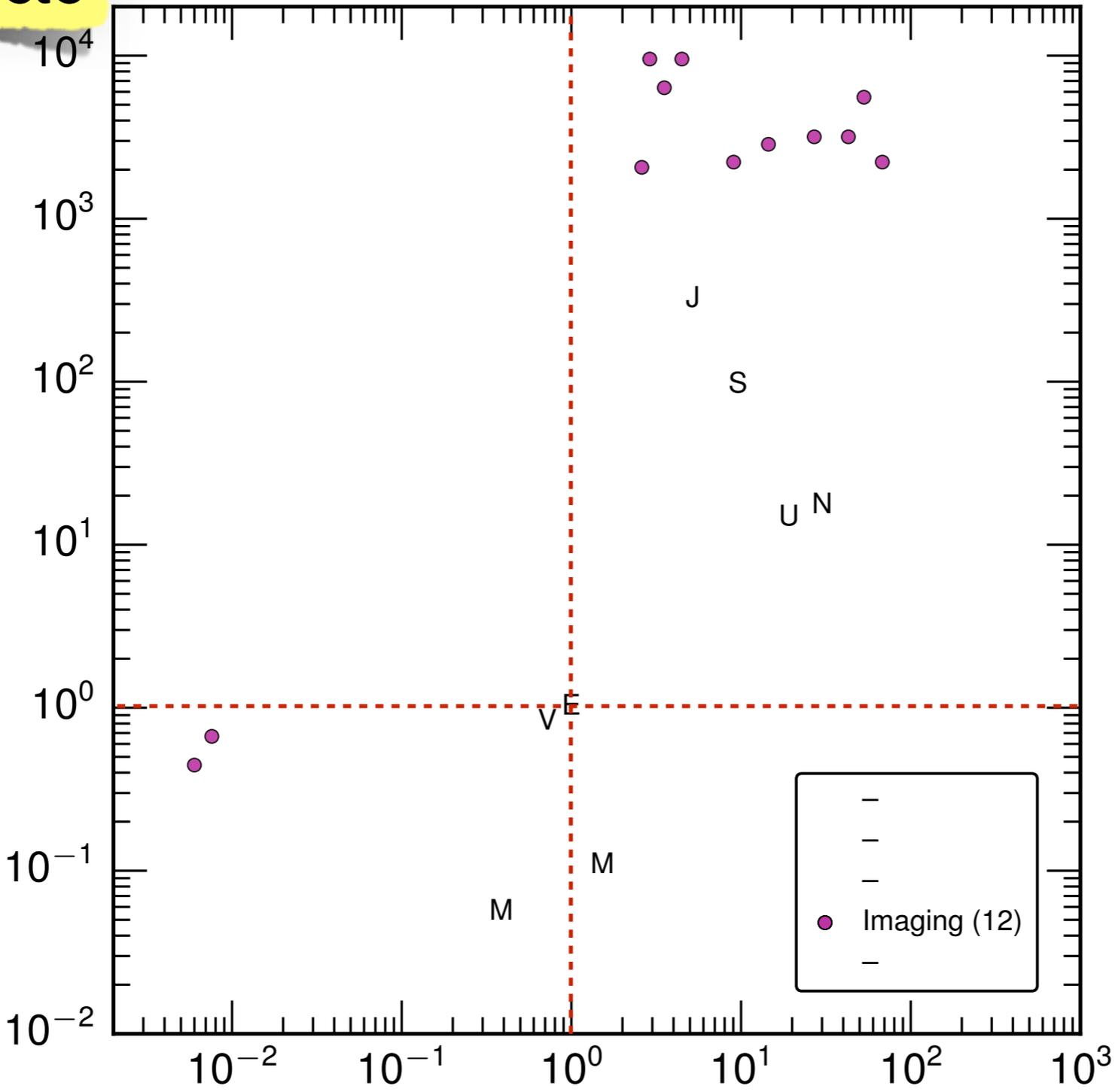


La Terre est au croisement des deux traits en pointillés

# Bilan des détections

## Imagerie directe

Masse de la planète  
(unité : Terre)



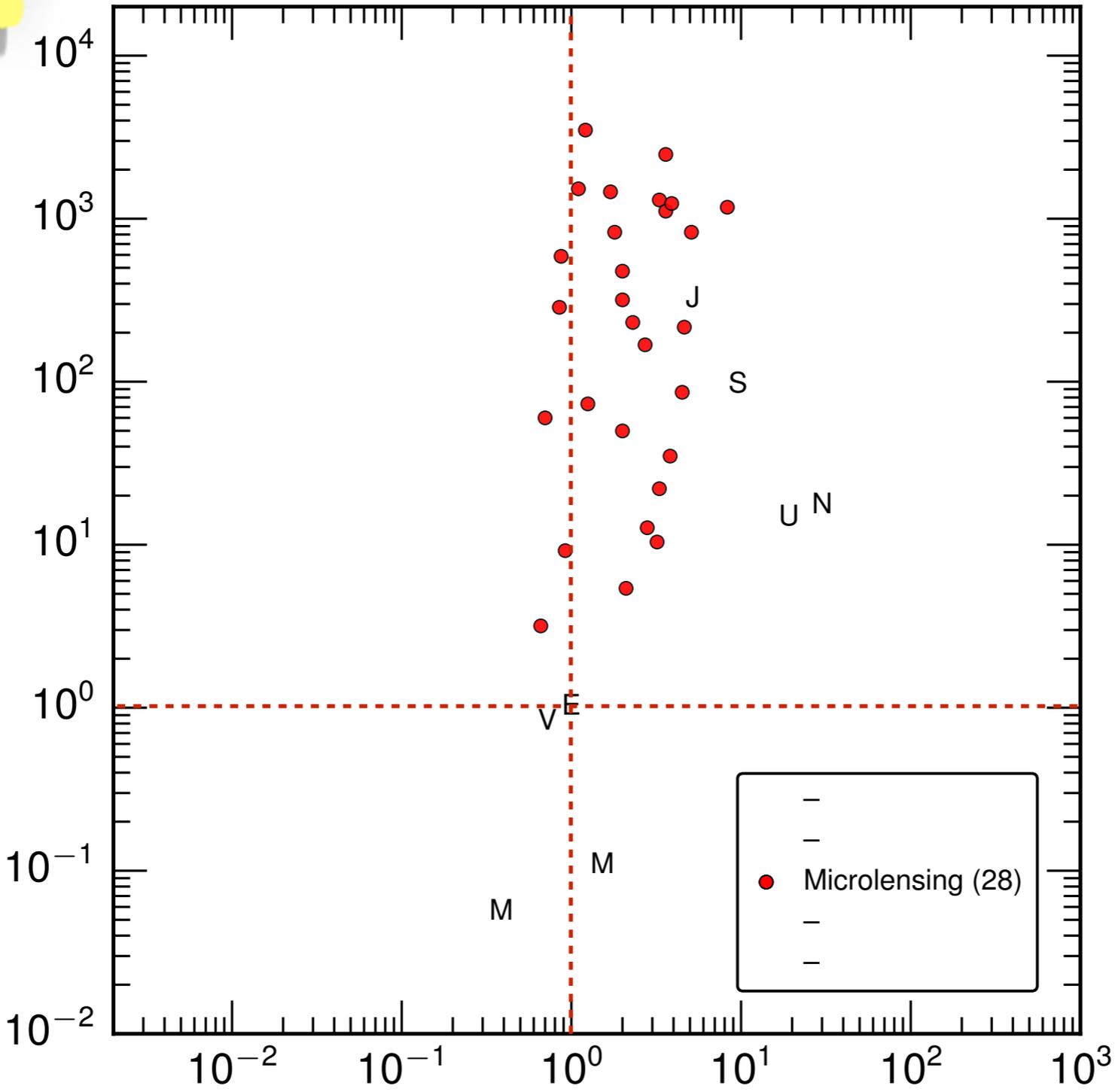
Distance planète-étoile  
(unité : distance Soleil-Terre)

La Terre est au croisement des deux traits en pointillés

# Bilan des détections

## Microlentilles

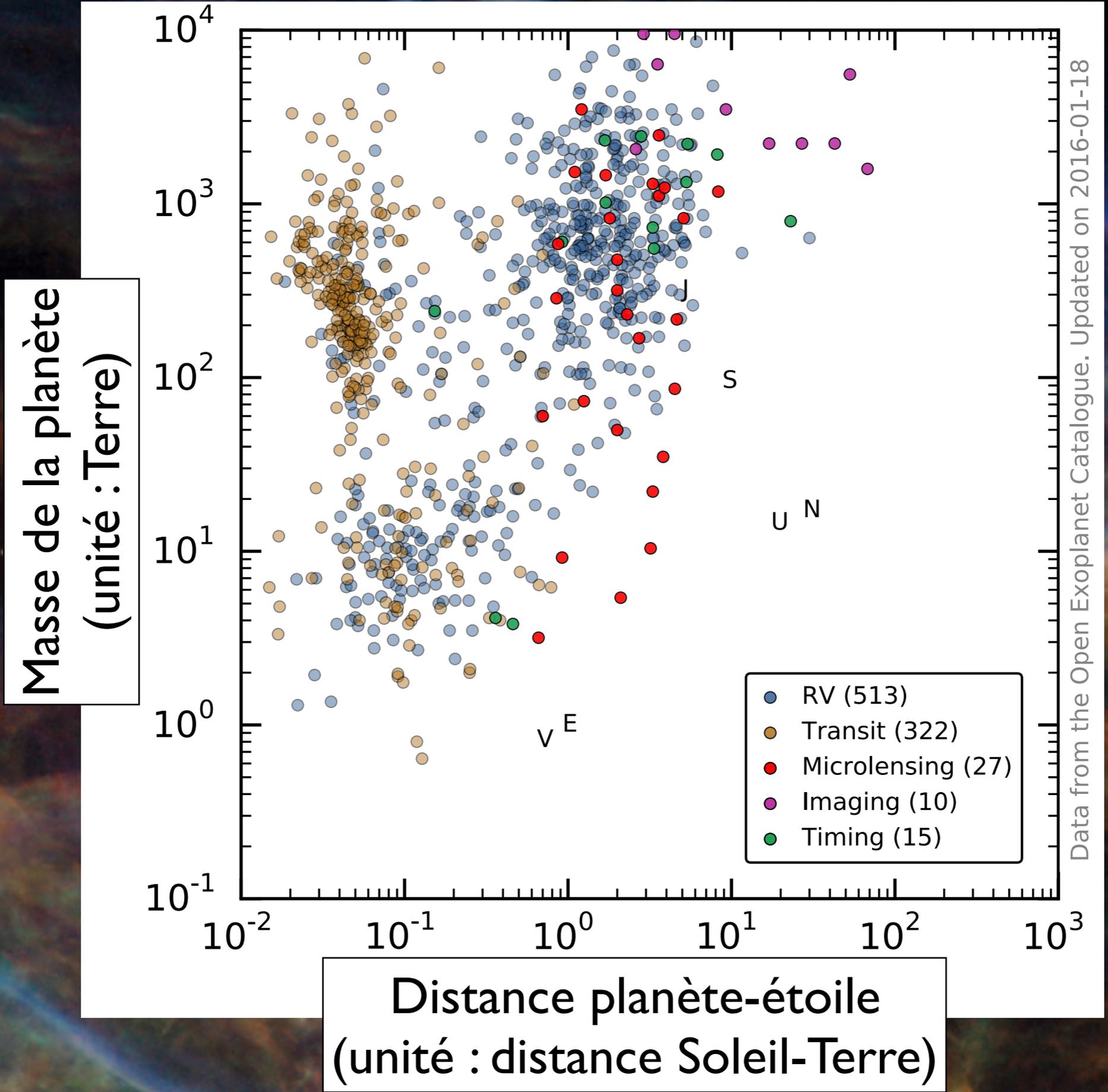
Masse de la planète  
(unité : Terre)



Distance planète-étoile  
(unité : distance Soleil-Terre)

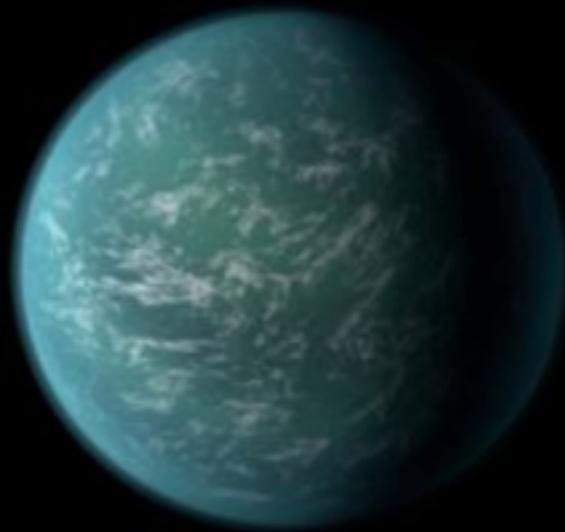
La Terre est au croisement des deux traits en pointillés

# Bilan des détections

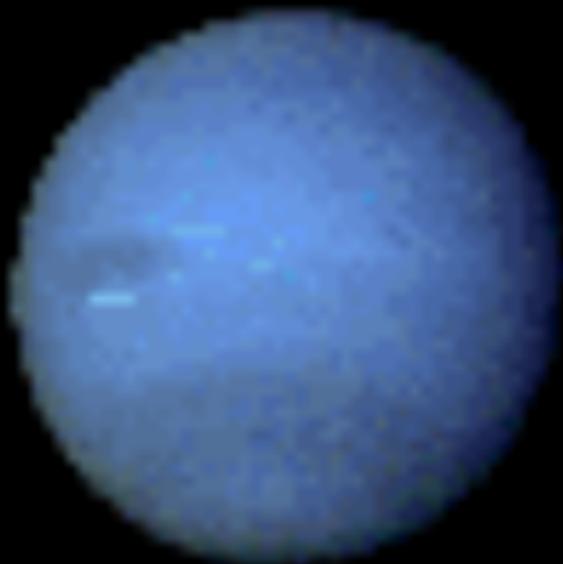
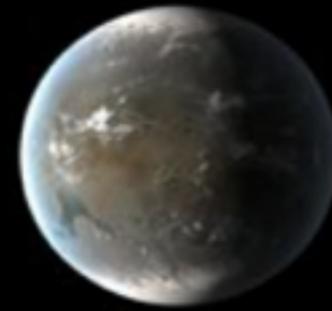
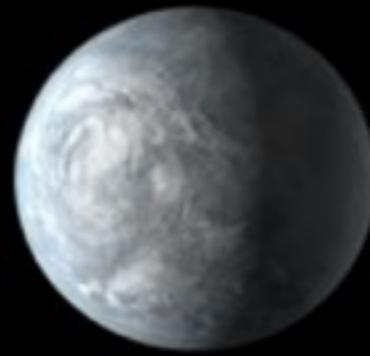
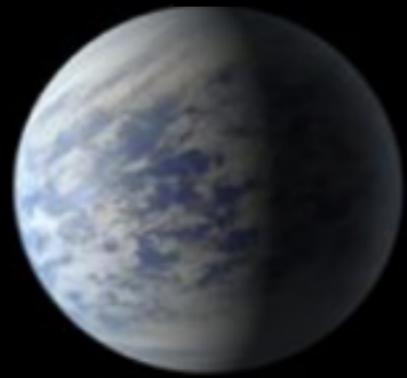


# Le grand bouleversement des paradigmes

## 1 De nouveaux types de planètes



Super-Terres : entre 2 à 10 fois la  
masse de la Terre

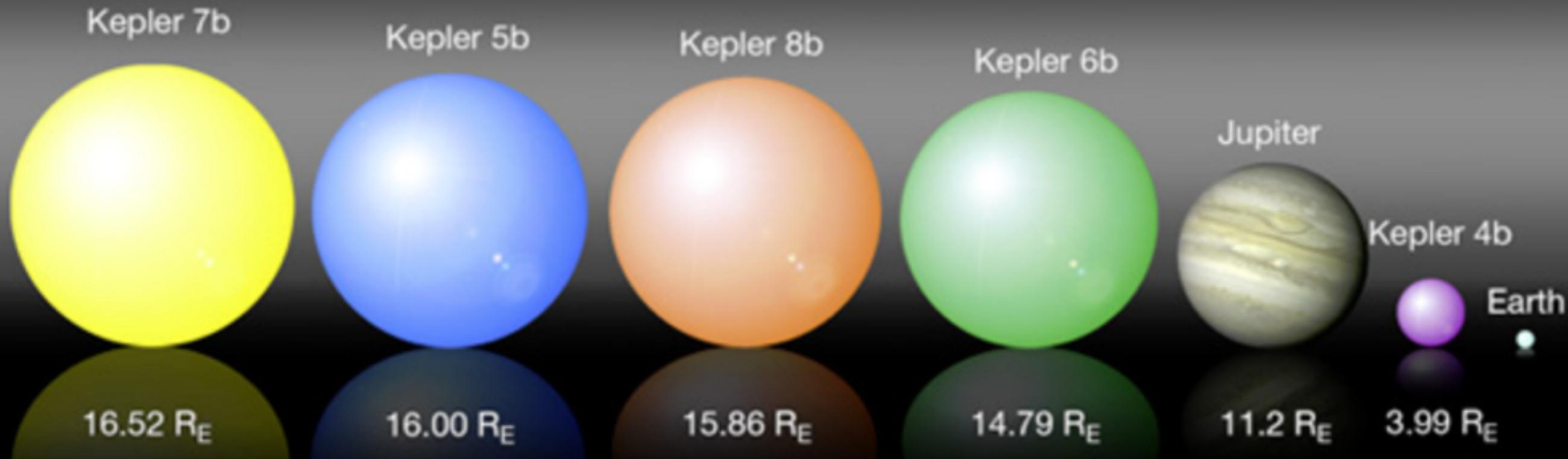


Rocheuses ? Glacées ? Planètes océans ?  
Coeur de planètes géantes ratées ?

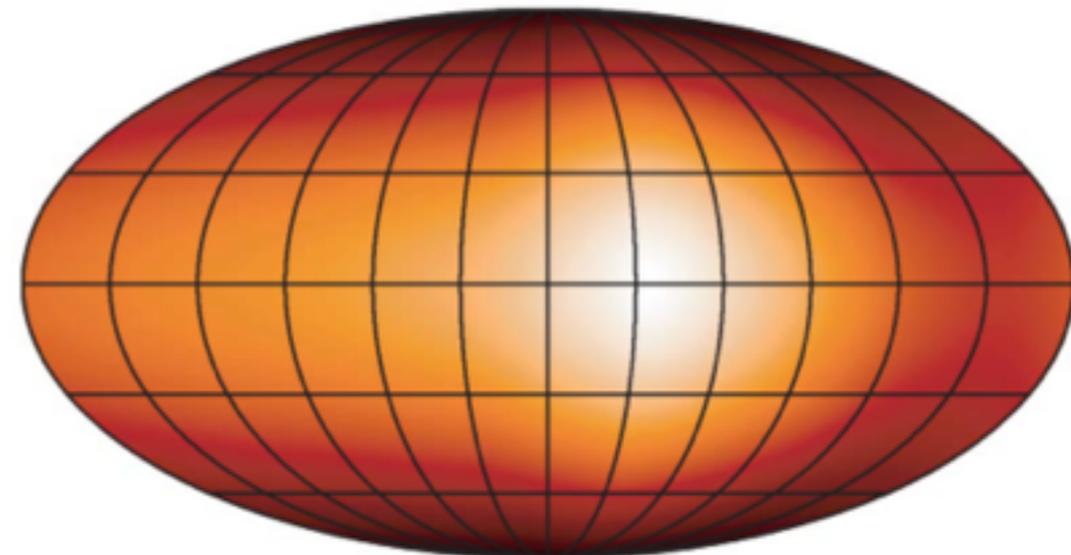
Mini-Neptunes ?

# Le grand bouleversement des paradigmes

Des Jupiters chauds enflés



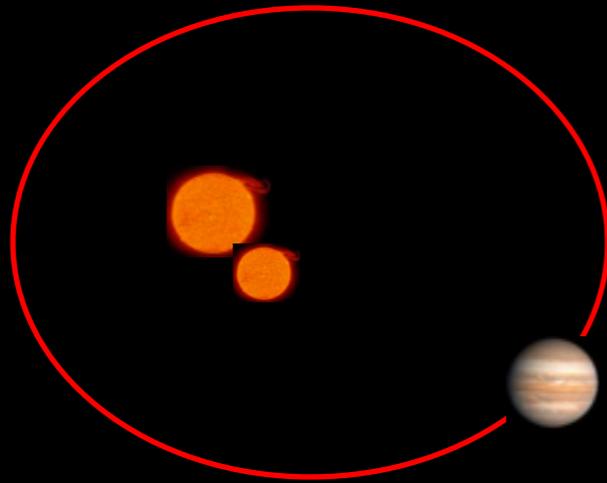
... qui peuvent être le siège de vents phénoménaux !



# Le grand bouleversement des paradigmes

## 2 Des planètes se forment autour d'étoiles multiples

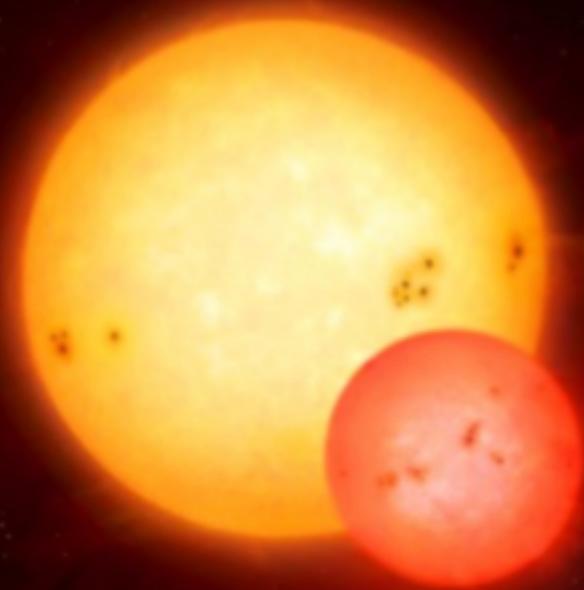
Exoplanètes circumstellaires



Exoplanètes autour d'une des étoiles



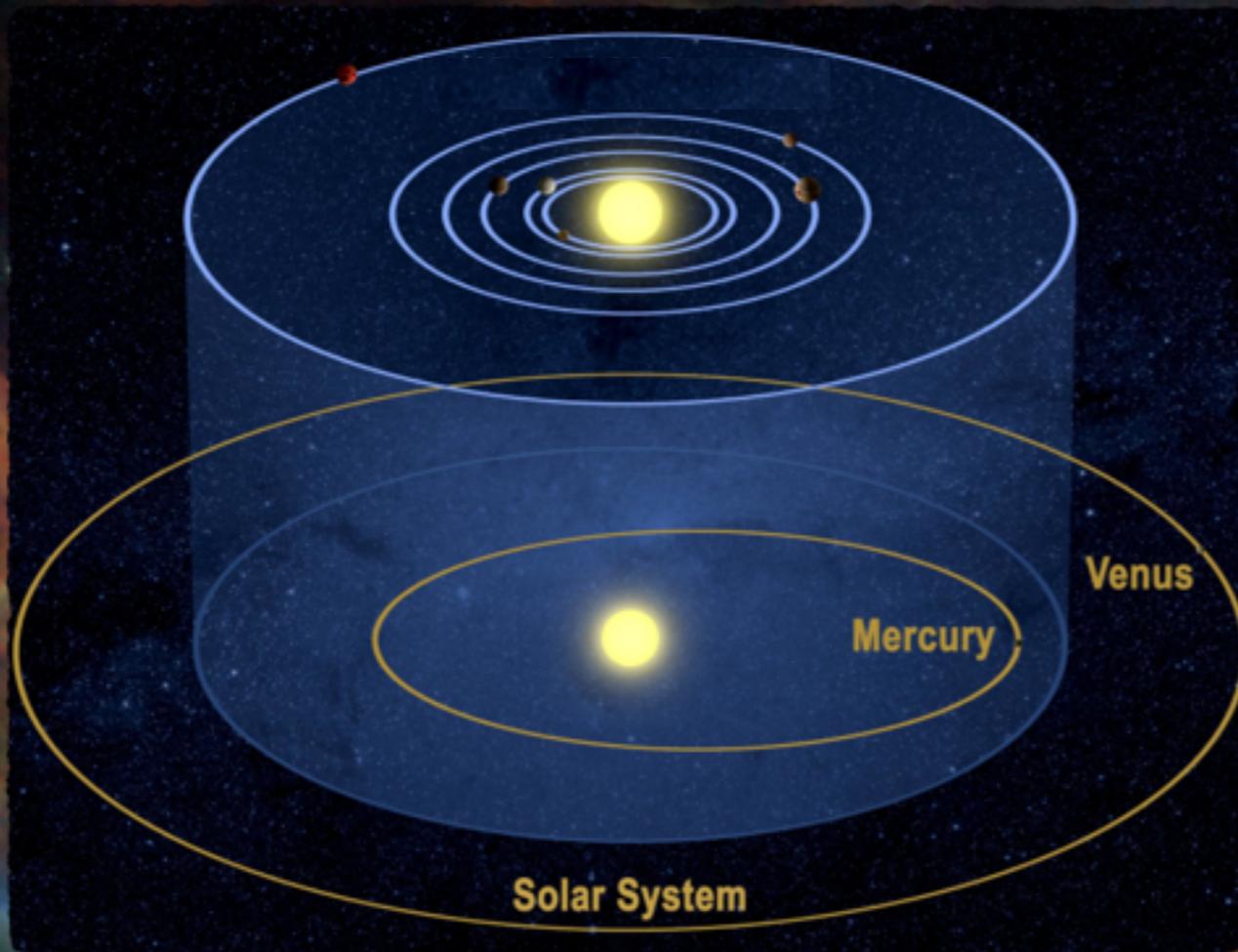
... dans tous les cas, plusieurs « soleils » dans le ciel !



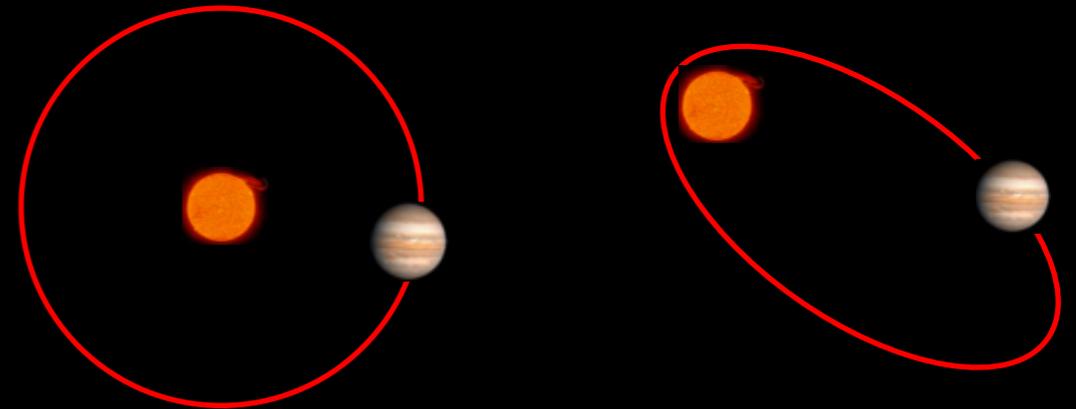
# Le grand bouleversement des paradigmes

## 3 Des orbites planétaires exotiques

Systemes très compacts !



Systemes aux orbites très elliptiques !



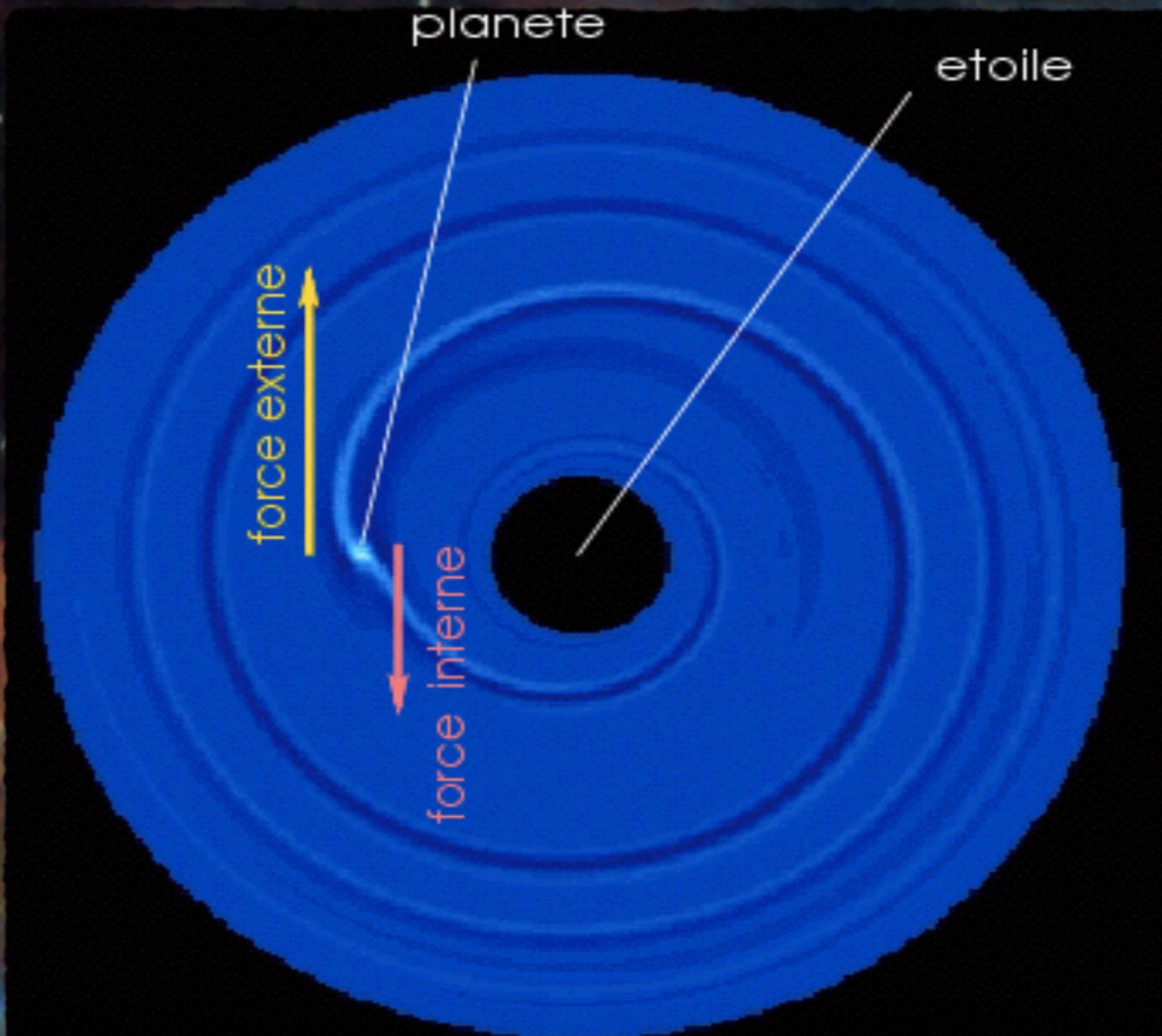
Orbite **circulaire**  
(ex. système solaire)

Orbite **elliptique**  
(de très nombreuses  
exoplanètes !)

# Le grand bouleversement des paradigmes

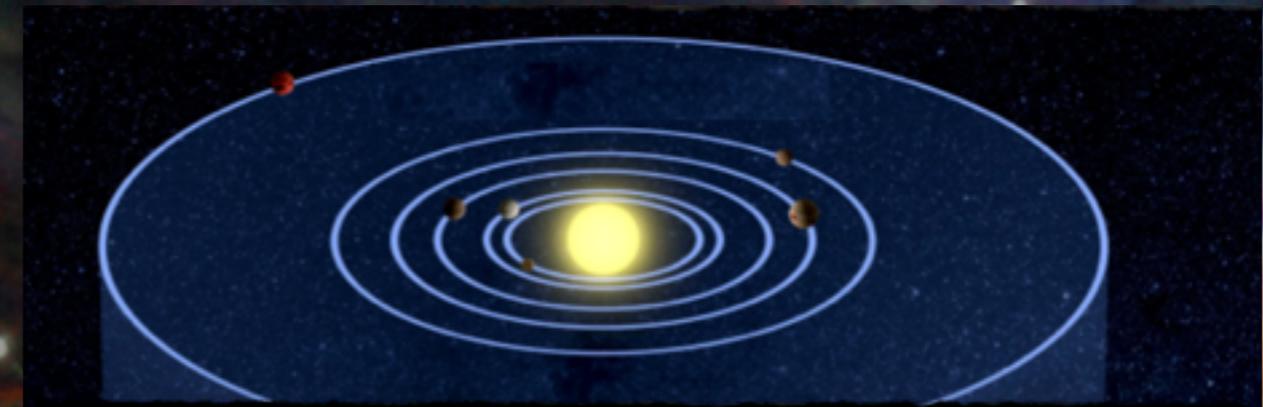
## 4 Les planètes migrent au cours de leur formation

Migration dans le disque de gaz et de poussière



La planète spirale vers l'intérieur, en direction de l'étoile : c'est l'explication des Jupiters chauds très proches de leurs étoiles

Migration par instabilité à plusieurs corps

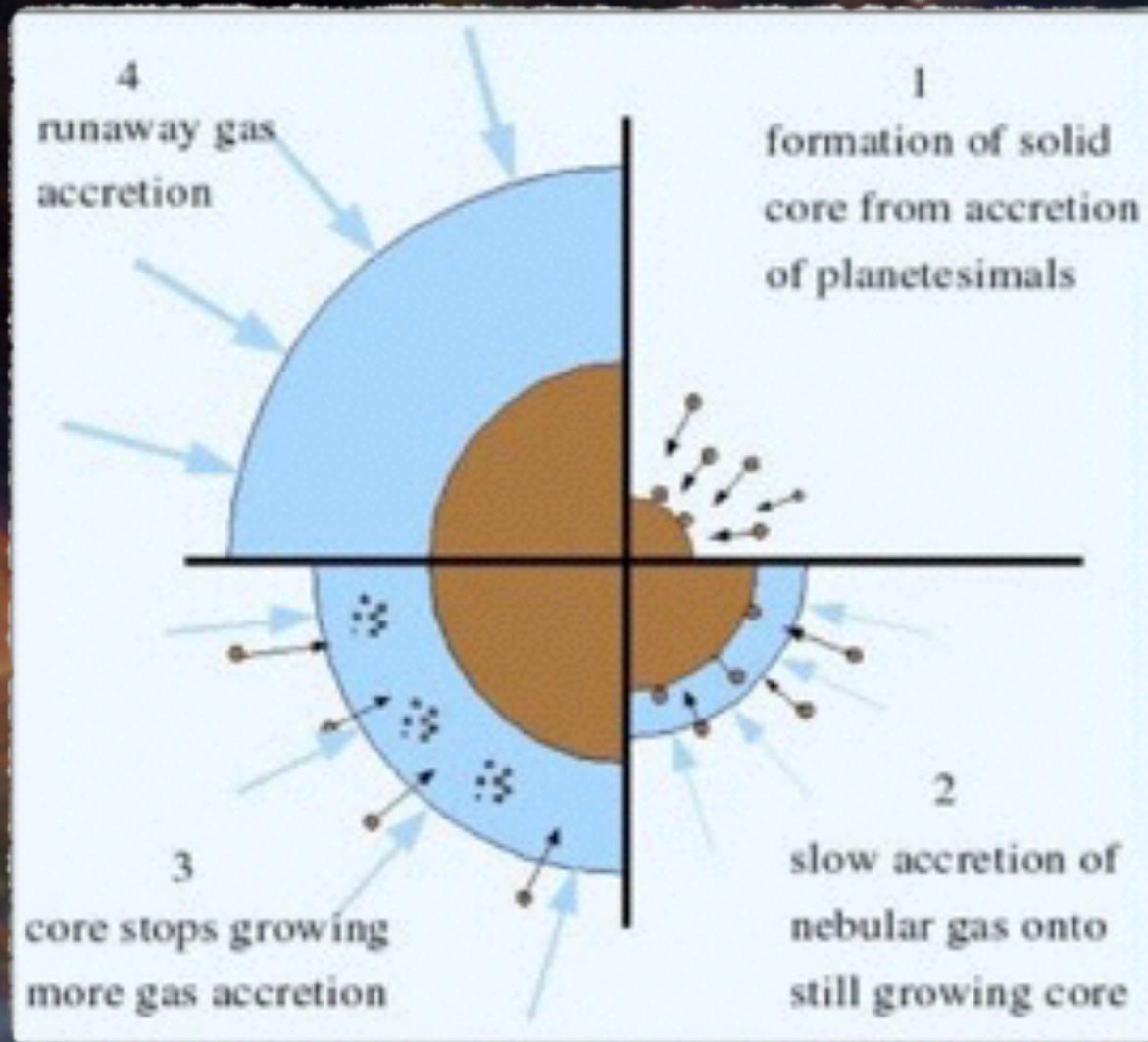


La gravité des planètes s'influence mutuellement : les orbites sont déstabilisées, ce qui peut conduire à un changement d'orbite des planètes.

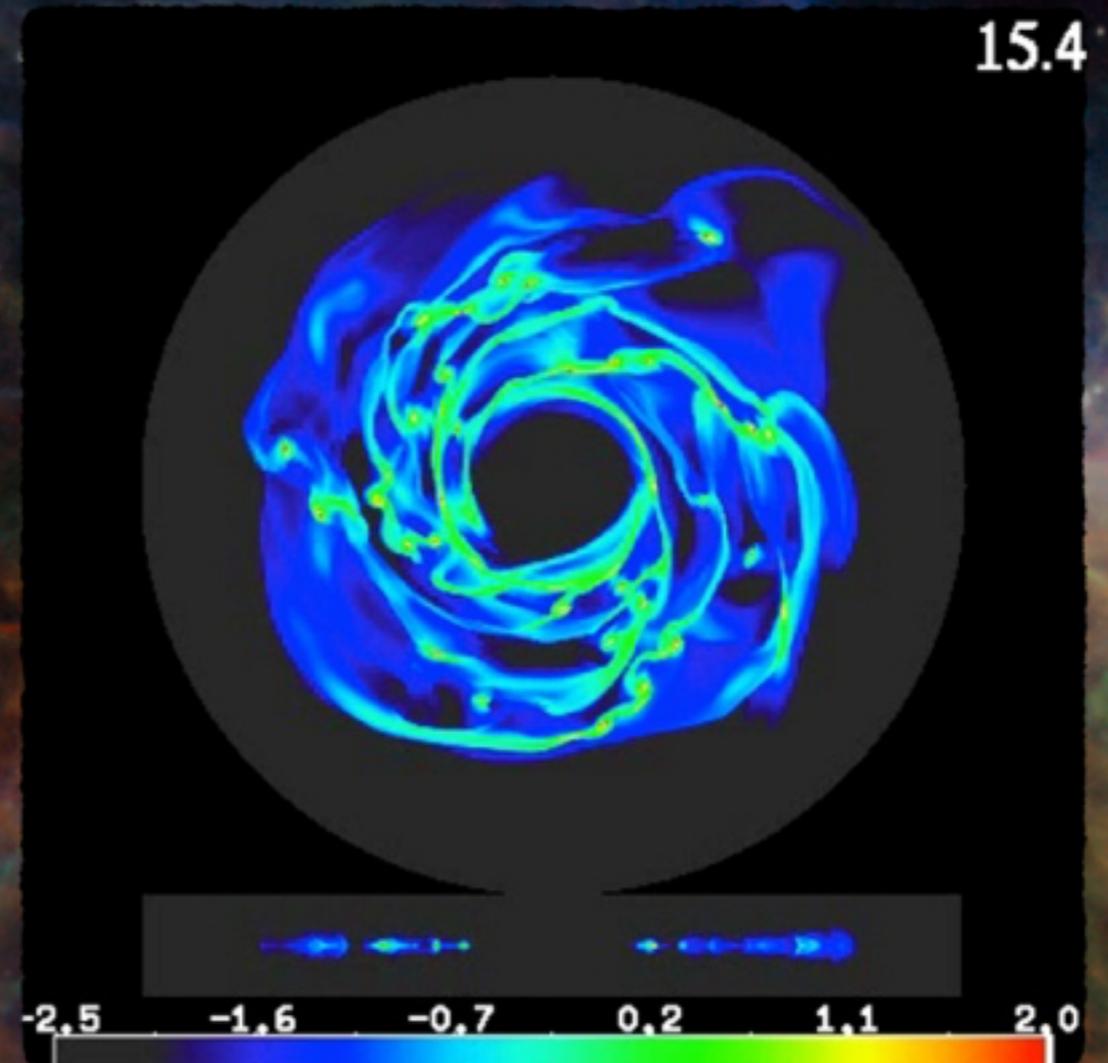
# Le grand bouleversement des paradigmes

## 5 Une probable multiplicité de mécanismes de formation planétaire

Formation par accrétion d'un cœur solide puis capture d'une atmosphère



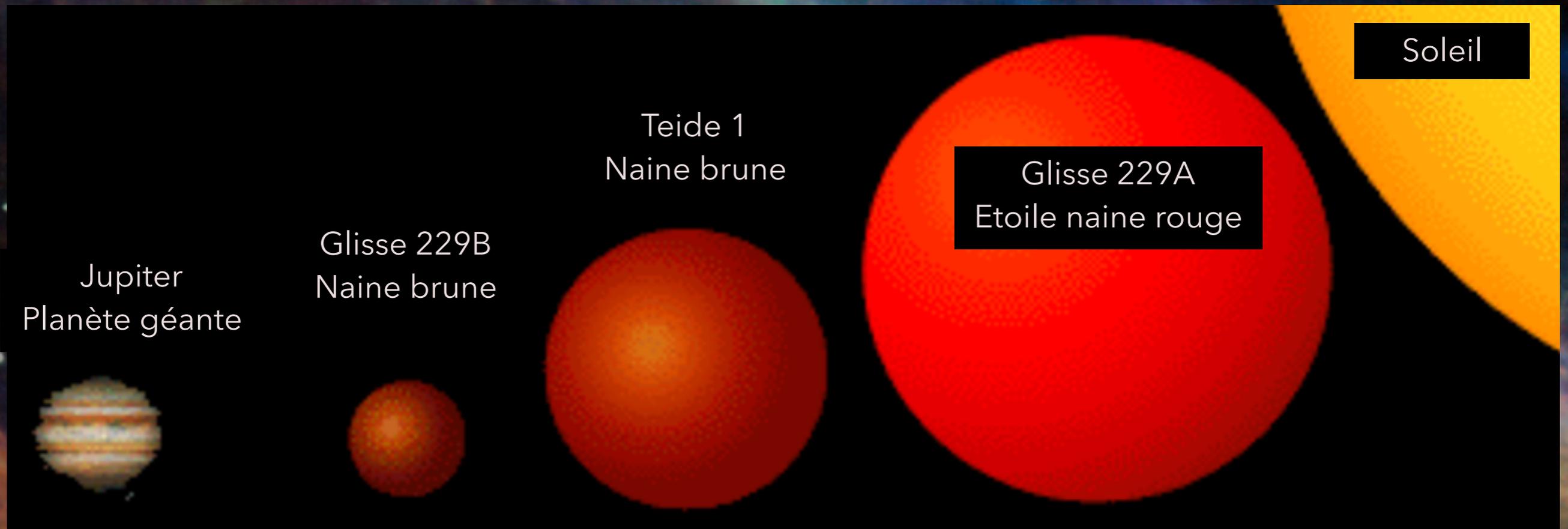
Formation par effondrement direct du gaz et de la poussière (par gravité)



... et plusieurs autres scénarios qui s'appliquent à diverses phases de la formation planétaire !

# Le grand bouleversement des paradigmes

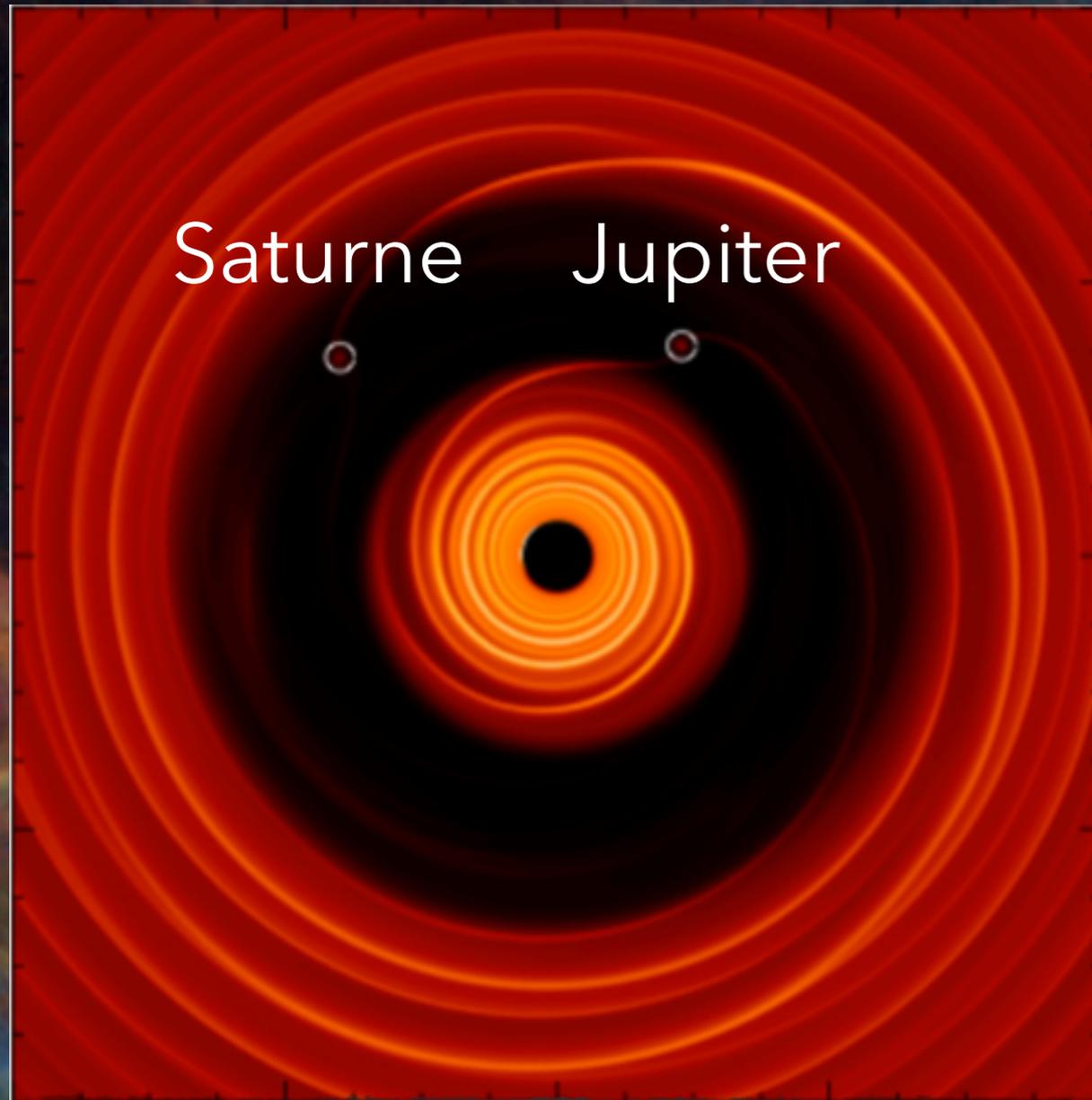
## 6 Une zone grise entre planètes et étoiles ratées



- Au delà de ces similarité en taille (rayon), on ne détecte pas de signe de changement de mécanisme de formation planétaire
- Dans la zone de masse concernée, entre les planètes géantes et les plus petites étoiles (entre environ 10 fois et 100 fois la masse de Jupiter), la population de ces objets est faible : c'est le **désert des naines brunes**

# Le grand bouleversement des paradigmes

## 7 L'histoire du système solaire en question



- On pensait que Jupiter s'était formé à sa position actuelle (formation *in situ*)
- Tout pousse à croire aujourd'hui que les planètes géantes (Jupiter et Saturne en particulier) ont **migré** vers le Soleil, puis de nouveau vers l'extérieur du système solaire
- De très grands bouleversements ont eu lieu, qui ont grandement affecté le système solaire (taille des planètes, apport de l'eau sur Terre par des astéroïdes glacés ramenés vers le Soleil)

# Le grand bouleversement des paradigmes

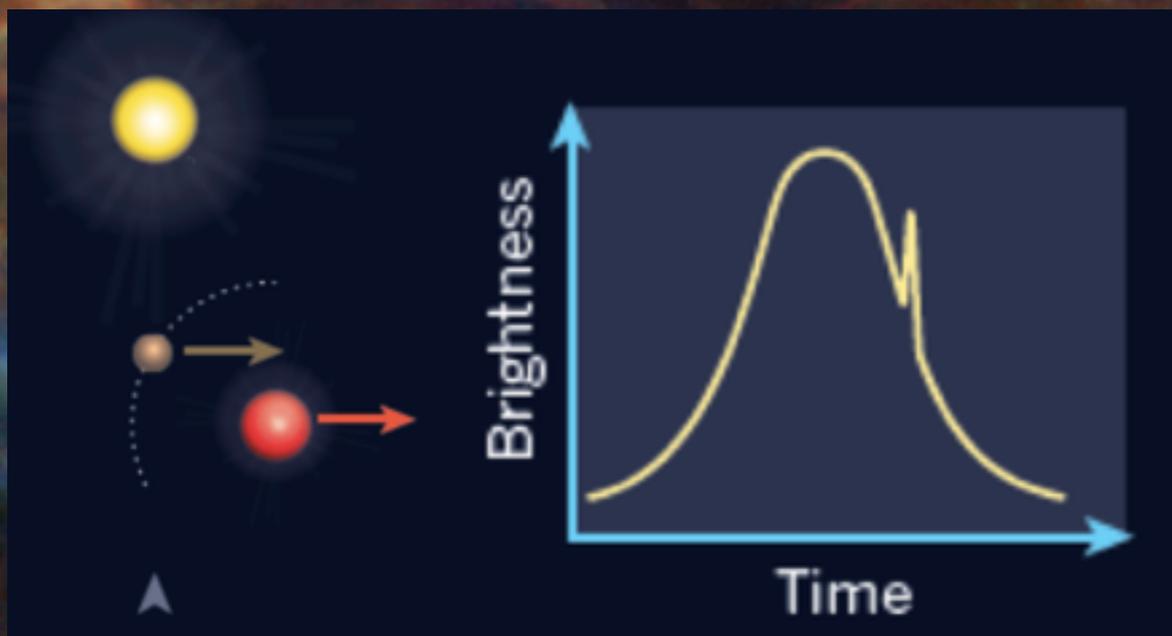
## 8 Des planètes isolées dans l'espace interstellaire

– Détection par imagerie directe



- Détection très délicate
- Planètes très massives (>10 fois Jupiter), mais ce sont peut-être des naines brunes
- Incertitudes élevée sur leur masse exacte

– Détection par microlentille



- Planètes de la masse de Jupiter
- Pourraient bien être aussi nombreuses que les étoiles dans la Voie Lactée !

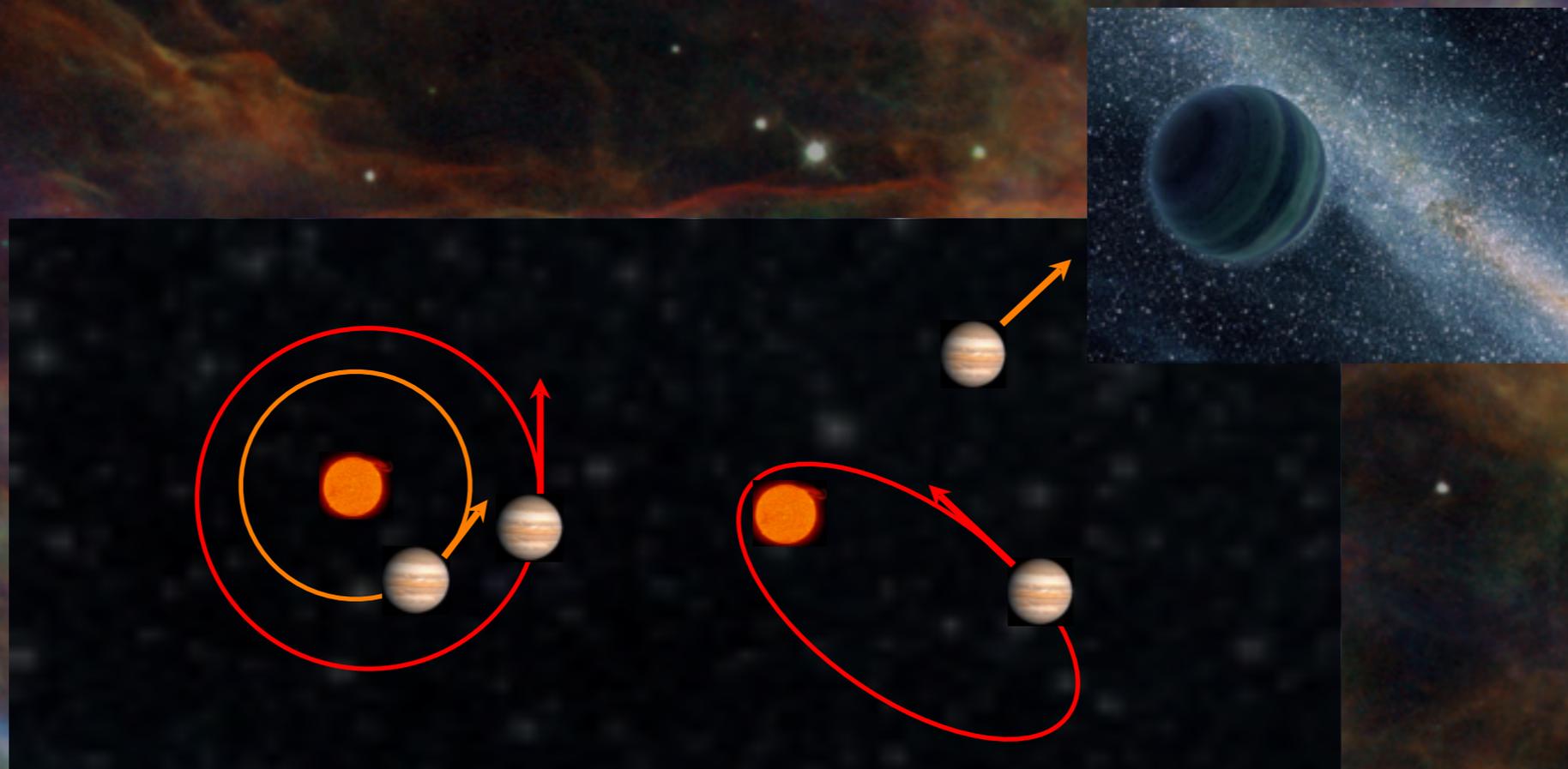
# Le grand bouleversement des paradigmes

## Quelle est l'origine de ces exoplanètes ?

### 1) Formation directe ?

... pas impossible pour les grosses planètes (>6 Jupiters)  
... très improbable pour les planètes de type Jupiter

### 2) Ejection in the post-gaseous phase of planet formation :



# Le grand bouleversement des paradigmes

## 9 Des planètes partout

2012 : Plus de planètes que d'étoiles

Etude statistique de 10 ans de données microlentille

12 JANUARY 2012 | VOL 481 | NATURE | 167

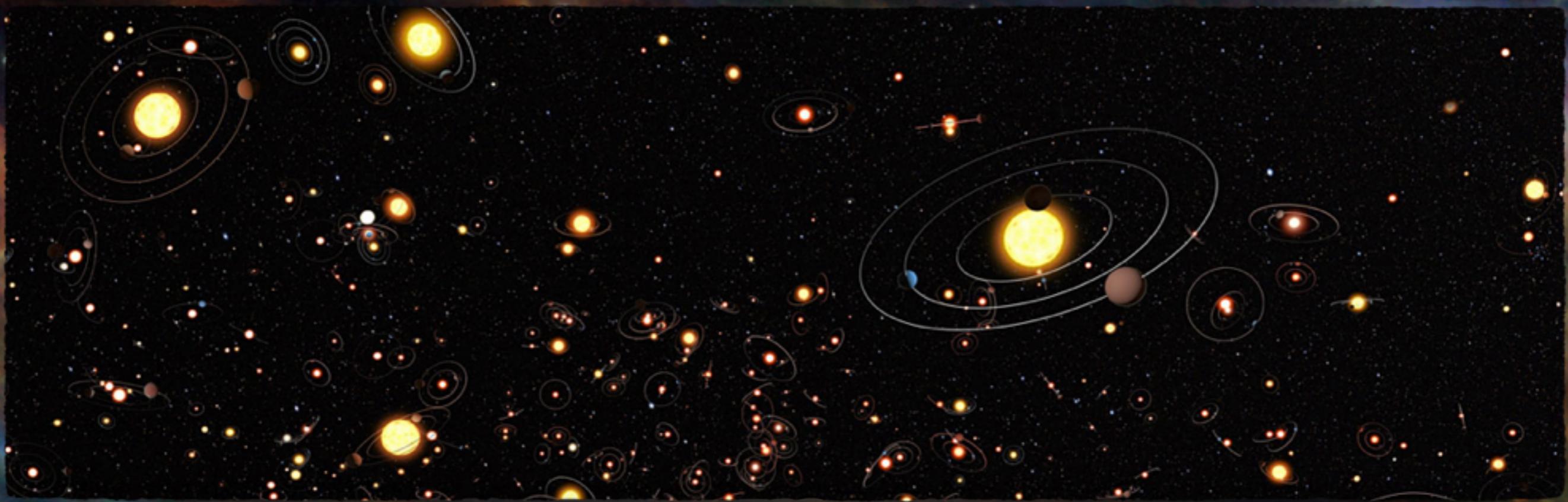
## One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations

A. Cassan<sup>1,2,3</sup>, D. Kubas<sup>1,2,4</sup>, J.-P. Beaulieu<sup>1,2,25</sup>, M. Dominik<sup>1,5</sup>, K. Horne<sup>1,5</sup>, J. Greenhill<sup>1,6</sup>, J. Wambsganss<sup>1,3</sup>, J. Menzies<sup>1,7</sup>, A. Williams<sup>1,8</sup>, U. G. Jørgensen<sup>1,9</sup>, A. Udalski<sup>10,11</sup>, D. P. Bennett<sup>1,12</sup>, M. D. Albrow<sup>1,13</sup>, V. Batista<sup>1,2</sup>, S. Brilliant<sup>1,4</sup>, J. A. R. Caldwell<sup>1,14</sup>, A. Cole<sup>1,6</sup>, Ch. Coutures<sup>1,2</sup>, K. H. Cook<sup>1,15</sup>, S. Dieters<sup>1,6</sup>, D. Dominis Prester<sup>1,16</sup>, J. Donatowicz<sup>1,17</sup>, P. Fouqué<sup>1,18</sup>, K. Hill<sup>1,6</sup>, N. Kains<sup>1,19</sup>, S. Kane<sup>1,20</sup>, J.-B. Marquette<sup>1,2</sup>, R. Martin<sup>1,8</sup>, K. R. Pollard<sup>1,13</sup>, K. C. Sahu<sup>1,14</sup>, C. Vinter<sup>1,9</sup>, D. Warren<sup>1,6</sup>, B. Watson<sup>1,6</sup>, M. Zub<sup>1,3</sup>, T. Sumi<sup>21,22</sup>, M. K. Szymański<sup>10,11</sup>, M. Kubiak<sup>10,11</sup>, R. Poleski<sup>10,11</sup>, I. Soszynski<sup>10,11</sup>, K. Ulaczyk<sup>10,11</sup>, G. Pietrzyński<sup>10,11,23</sup> & Ł. Wyrzykowski<sup>10,11,24</sup>

Most known extrasolar planets (exoplanets) have been discovered using the radial velocity<sup>1,2</sup> or transit<sup>3</sup> methods. Both are biased towards planets that are relatively close to their parent stars, and studies find that around 17–30% (refs 4, 5) of solar-like stars host a planet. Gravitational microlensing<sup>6–9</sup>, on the other hand, probes planets that are further away from their stars. Recently, a population of planets that are unbound or very far from their stars was discovered by microlensing<sup>10</sup>. These planets are at least as numerous as the stars in the Milky Way<sup>10</sup>. Here we report a statistical analysis of microlensing data (gathered in 2002–07) that reveals the fraction of bound planets 0.5–10 AU (Sun–Earth distance) from their stars. We find that  $17^{+6}_{-9}\%$  of stars host Jupiter-mass planets ( $0.3\text{--}10 M_J$ , where  $M_J = 318 M_\oplus$  and  $M_\oplus$  is Earth's mass). Cool Neptunes ( $10\text{--}30 M_\oplus$ ) and super-Earths ( $5\text{--}10 M_\oplus$ ) are even more common: their respective abundances per star are  $52^{+22}_{-29}\%$  and  $62^{+35}_{-37}\%$ . We conclude that stars are orbited by planets as a rule, rather than the exception.

# Le grand bouleversement des paradigmes

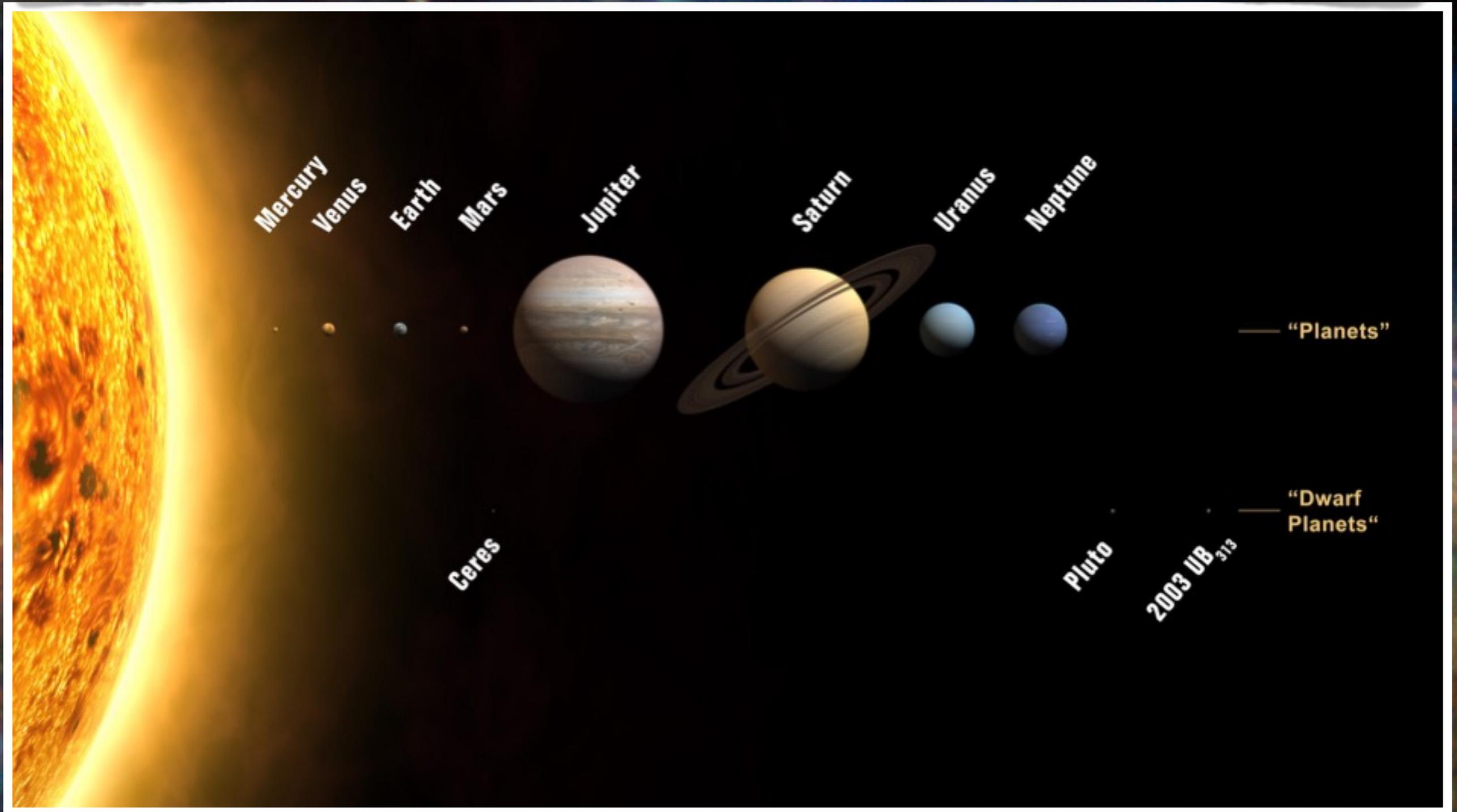
- Microlentilles : en moyenne, il y a plus d'une planète par étoile... soit plus de 100 milliards de planètes dans la Voie Lactée !
- Les planètes de faible masse (super-Terre) sont bien plus abondantes que les planètes géantes !
- Doppler et transits : les planètes terrestres préfèrent les systèmes multi-planétaires



**Les exoplanètes sont partout dans la Voie Lactée !**

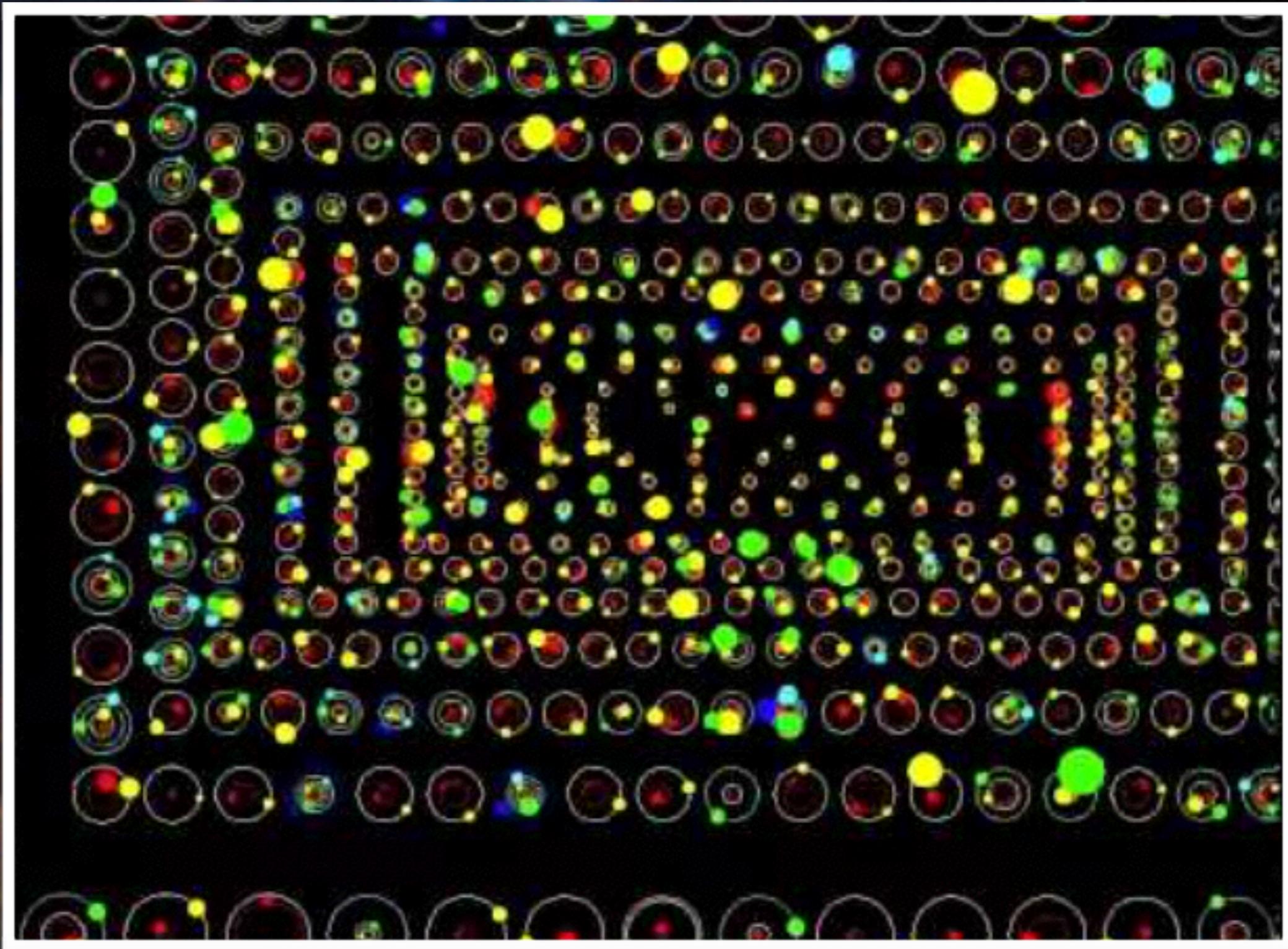
# Photo de famille du Système solaire...

Le système solaire...



... il y a à peine 20 ans, le seul système planétaire connu !

... et celle des exoplanètes

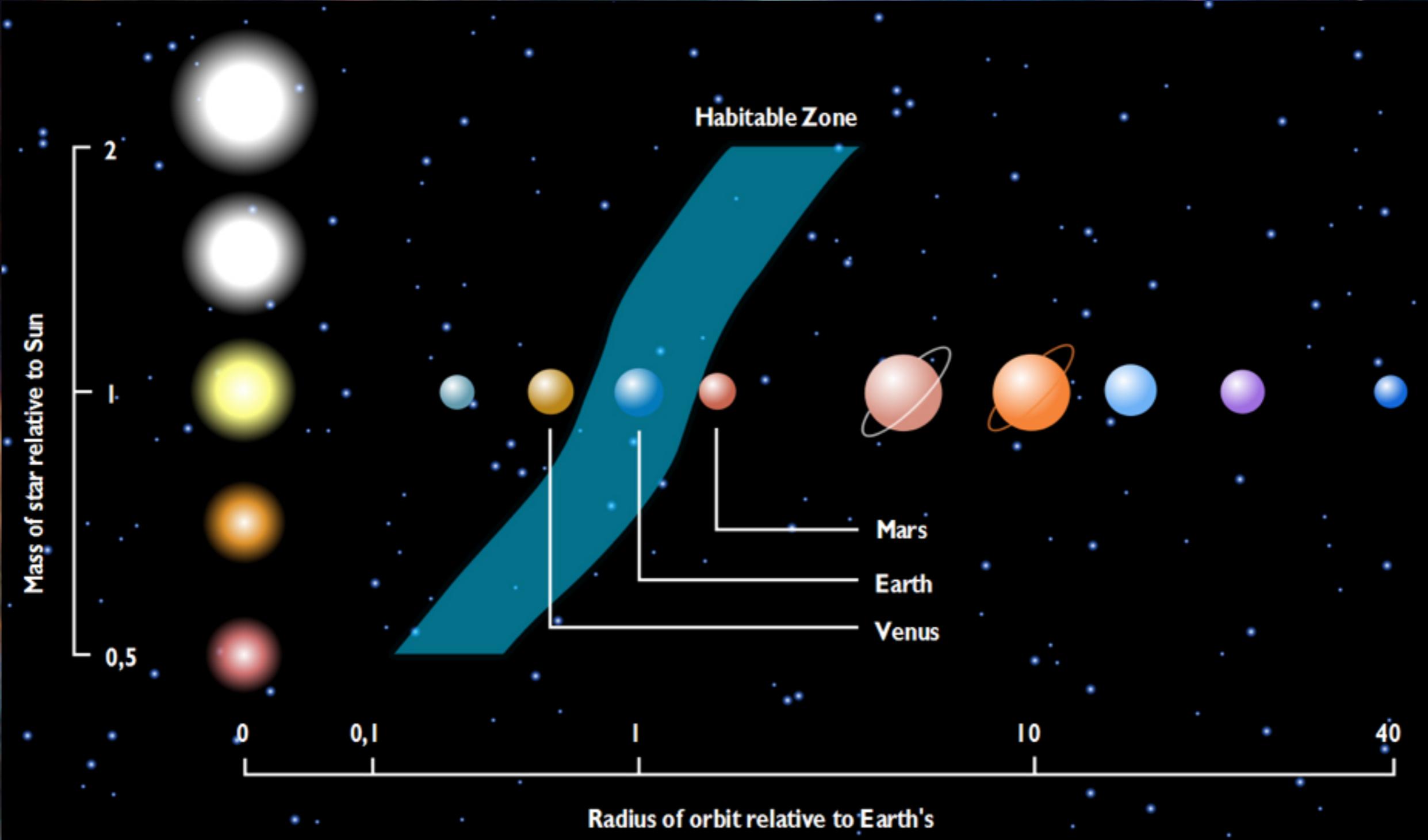


En 25 ans de recherche, une extraordinaire variété de systèmes planétaires ont découverts !

# La recherche de la vie ailleurs dans l'Univers

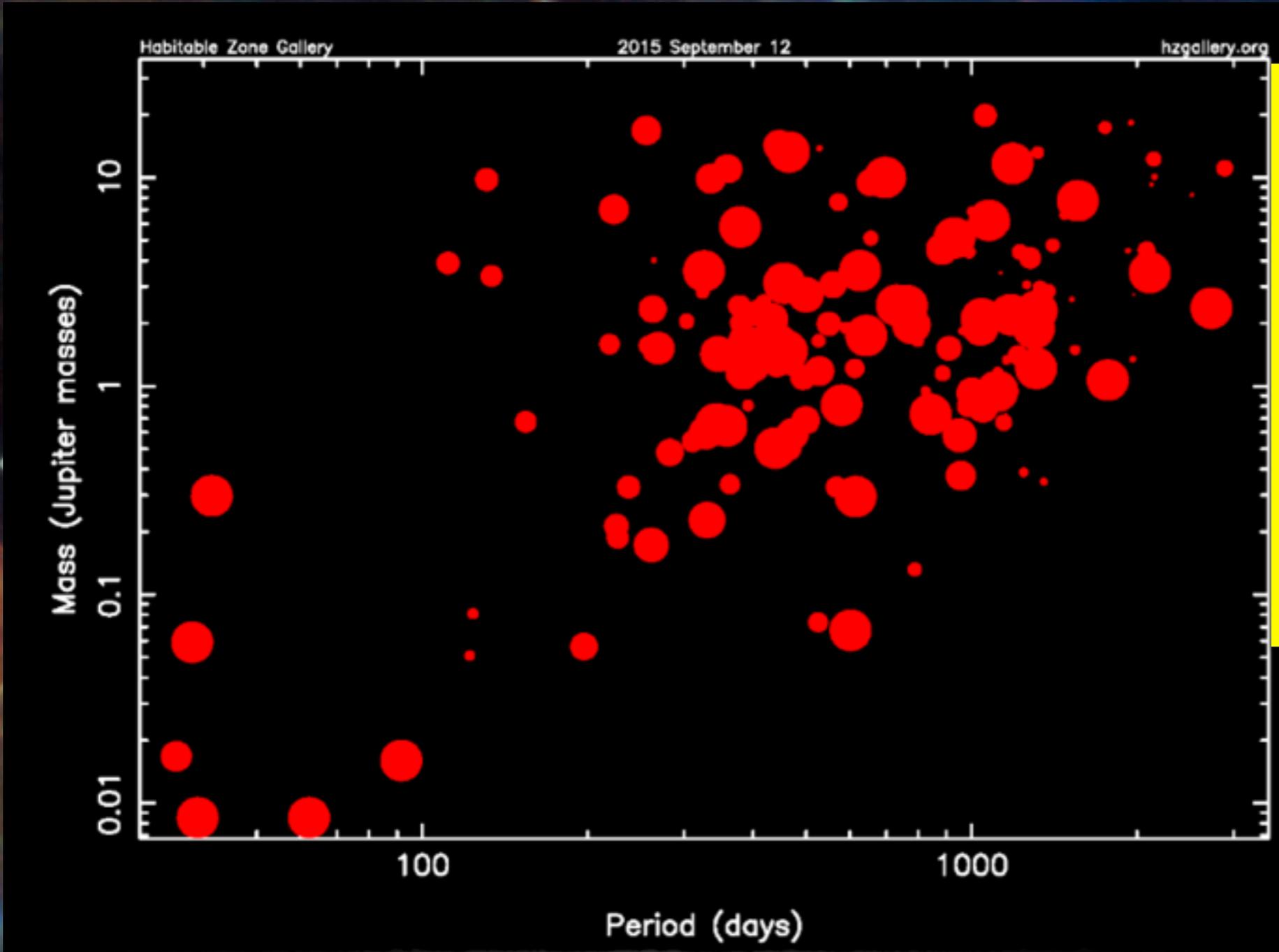
## Une zone « habitable » ?

Zone « habitable » : Région autour de l'étoile où l'eau peut exister à l'état liquide



# La recherche de la vie ailleurs dans l'Univers

Planètes détectées dans la zone « habitable » de leur étoile



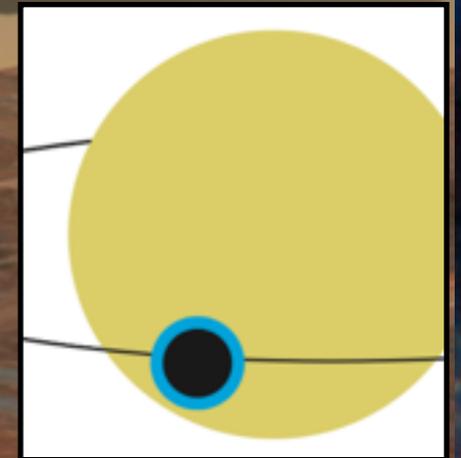
Ces planètes géantes ne ont très peu de chance d'être habitables !

L'habitabilité dépend de beaucoup de choses ! Les lunes de planètes géantes pourraient être habitables.

# La recherche de la vie ailleurs dans l'Univers

Recherche d'une nouvelle Terre ?

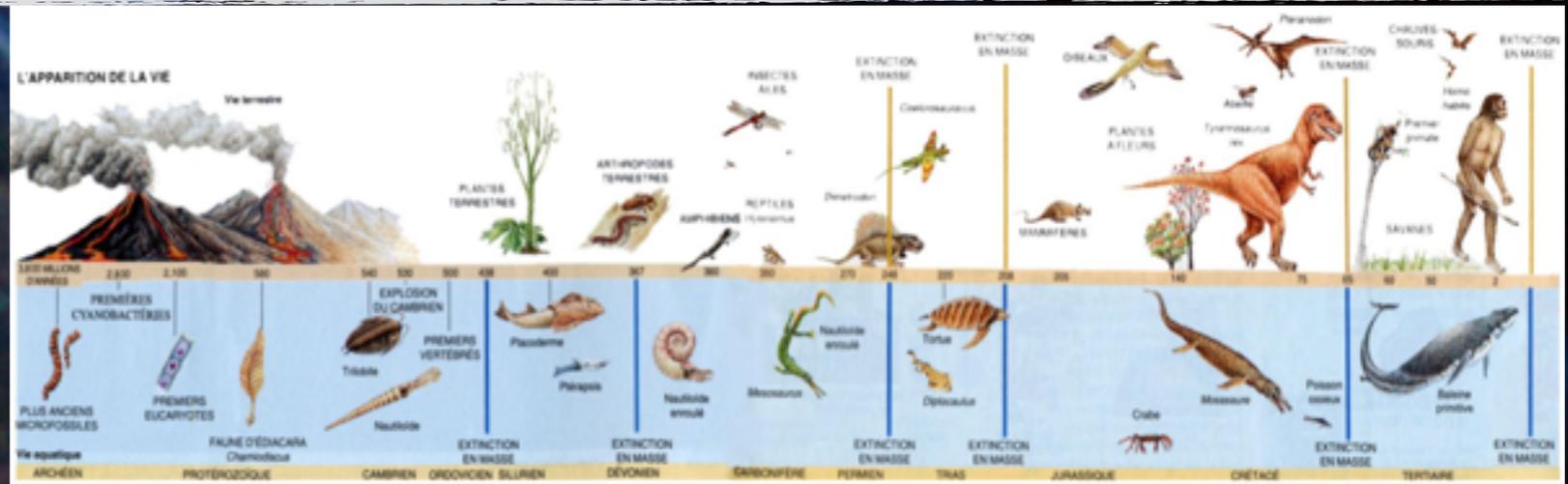
- détecter des planètes comme la Terre : argument statistique
- détecter directement des molécules bio-marqueurs par spectroscopie



*ESO E-ELT  
Extremely Large Telescope  
(en construction, désert  
d'Atacama, Chili)*

# La recherche de la vie ailleurs dans l'Univers

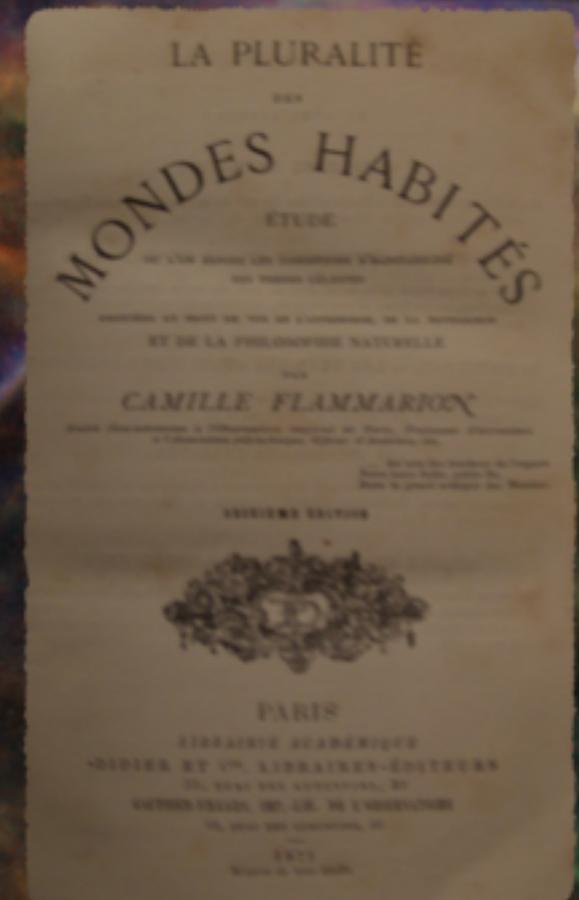
– Comprendre l'émergence de la Vie est très difficile, déjà pour la vie sur Terre !



– Cependant, il paraît clair que quand les conditions d'émergence sont réunies, la vie est opportuniste et peut se développer très vite  
– Dans le cas où une planète devient non-habitable (cataclysme), elle peut se préserver à l'état dormant et se re-développer quand les conditions deviennent à nouveau propices

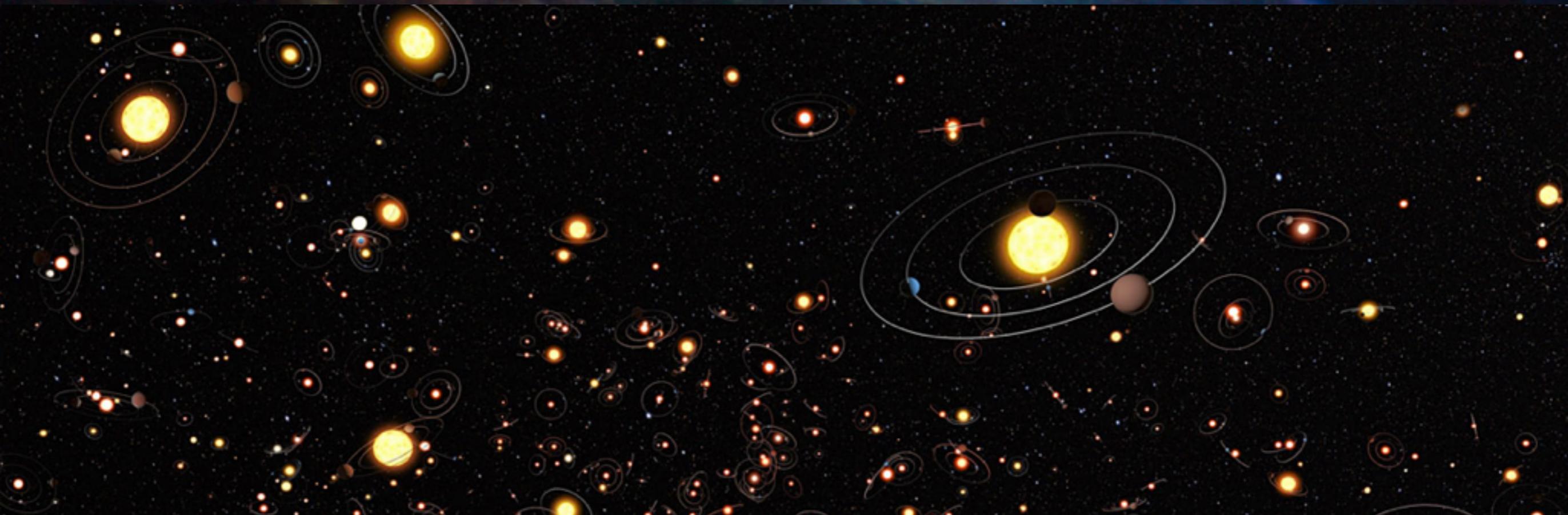
– L'étude des exoplanètes nous apprend que les planètes dans la Voie Lactée sont la règle plutôt que l'exception, et qu'il existe une extraordinaire diversité des systèmes planétaires et des planètes

**C'est un signe très optimiste que la vie existe peut-être ailleurs dans notre vaste Univers !**



... la recherche continue !

---



Merci de votre attention