

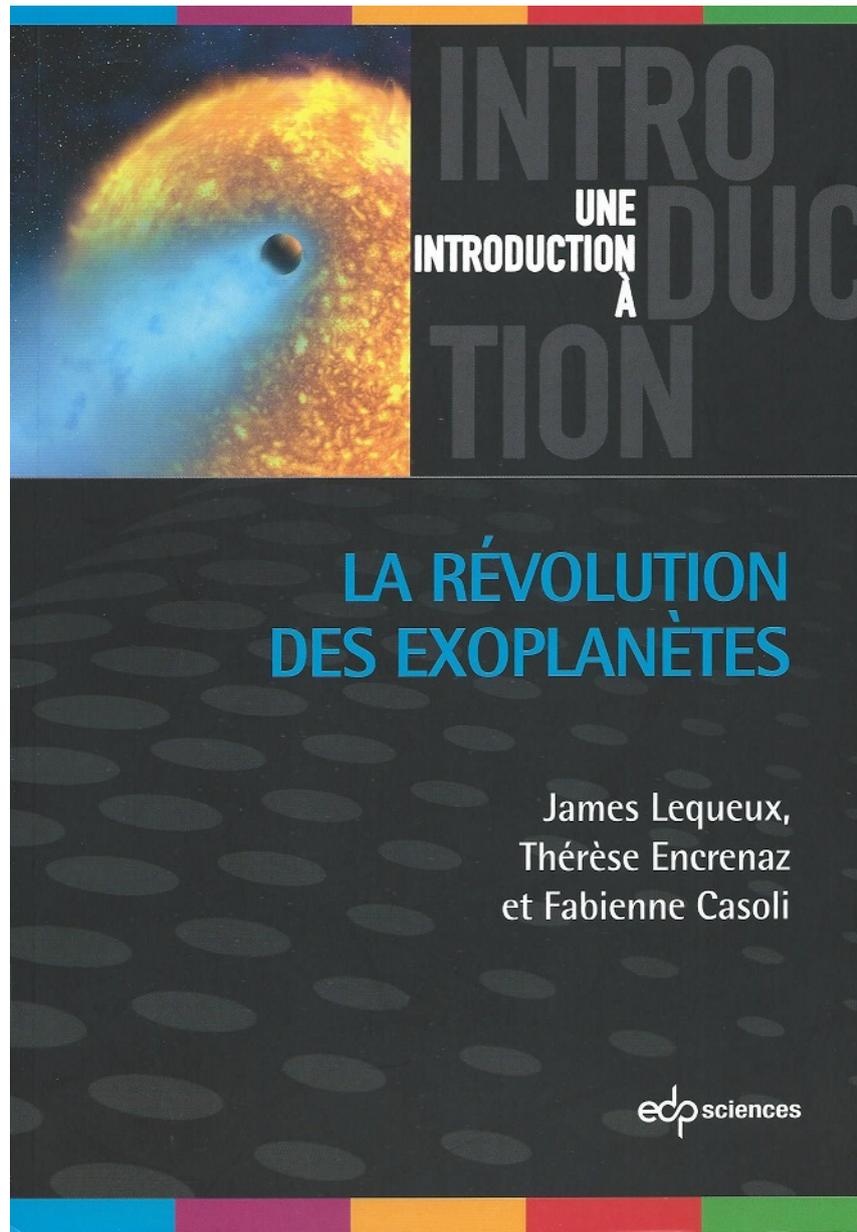
LES EXOPLANETES

Préhistoire des exoplanètes

Comment on détecte les exoplanètes

~~Formation et évolution des systèmes planétaires~~
(pour plus tard)

Habitabilité et recherche d'indices du vivant
(quelques mots sur ce vaste sujet...)



édition Juin 2017

Une idée très ancienne

Antiquité gréco-latine: réflexions spéculatives sur l'existence de plusieurs mondes

Epicure (grec, ~342-270 av. JC) :

« L'Univers est infini ... Il y a une infinité de mondes, dont les uns ressemblent à celui-ci, les autres ne lui ressemblent pas »

Lucrèce (Rome, ~94-54 av. JC) :

« Le ciel, la Terre, le Soleil, la Lune, la mer, tous les corps enfin, ne sont pas uniques, mais plutôt infinis en nombre »

La Renaissance : l'idée se précise

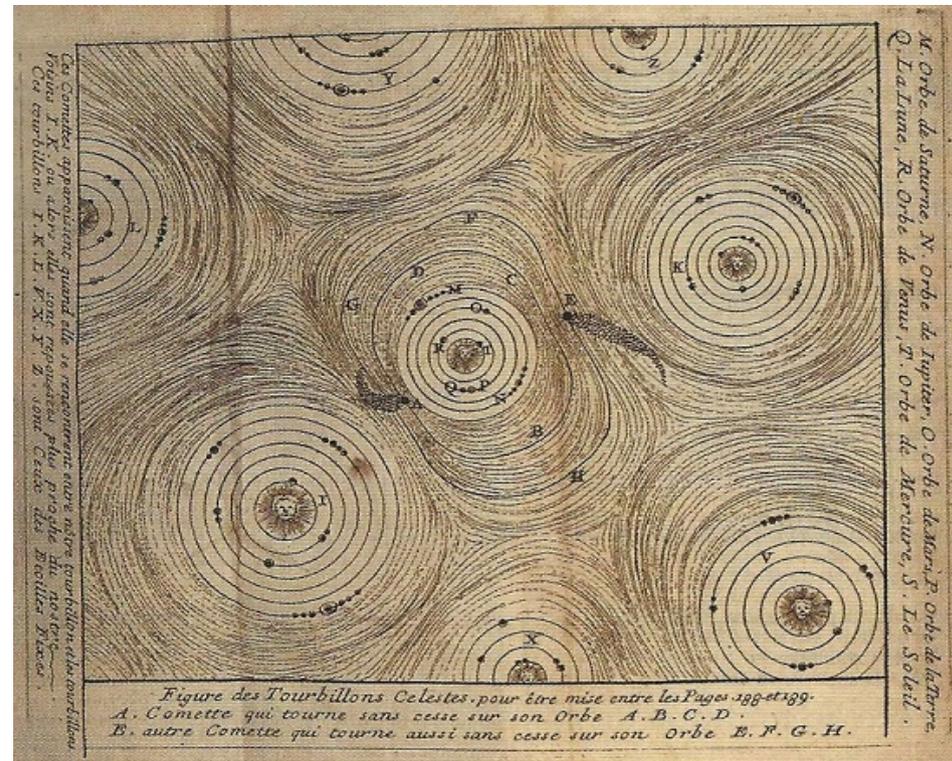
Nicolas de Cues (1401-1464) : l'Univers est une sphère infinie dont la Terre n'a aucune raison d'en être le centre

Giordano Bruno (1548-1600), adepte du système de Copernic : il existe une infinité de mondes, d'autres mondes sont habités

→ conflit idéologique avec la doctrine religieuse, persécutions (G. Bruno au bûcher, Galilée en prison doit « abjurer »)

mais la connaissance progresse (Copernic, Kepler ...) et des théories de l'Univers se construisent

René Descartes (1596-1650) : modèle évolutif du monde basé sur des « tourbillons »



Isaac Newton (1642-1727) construit un modèle du monde basé sur la théorie de la gravitation universelle, qui explique les observations (mais n'est pas évolutif)

L'existence de mondes habités, principalement les planètes du système solaire, est la question qui prédomine et qui passionne aux 18^e et 19^e siècles :

Fontenelle (1657-1757), *Entretiens sur la pluralité des mondes*, Huyghens (1629-1695), *Cosmotheoros*, jusqu'à Camille Flammarion (1842-1925), *La pluralité des mondes habités* ...

mais... aucune observation astronomique ne confirme l'hypothèse de mondes habités ni l'existence d'autres mondes en-dehors du système solaire

→ le sujet n'intéresse plus les scientifiques, qui se tournent vers la formation du système solaire

Questionnement sur la formation du système solaire :

Kant (1724-1804) et Laplace (1749-1813) : masse nébulaire initiale où naissent l'étoile puis les planètes

Herschel (1738-1822) observe des « nébuleuses planétaires » entourant certaines étoiles... mais ce sont pour la plupart les produits d'une étoile en fin de vie ou les restes d'une étoile morte

Nombreuses observations interprétées de façon erronée jusqu'au milieu du 20^e siècle : la technique instrumentale est insuffisante pour détecter les exoplanètes

- pouvoir séparateur limité ~ 1 arc sec (turbulence atmosphérique) \rightarrow astrométrie inefficace
- résolution spectroscopique et précision photométrique insuffisantes

1952 : Otto Struve (Russe installé aux USA), constatant que la détection directe a échoué, propose des méthodes indirectes avec des contraintes de détectabilité.

Considérant une grosse planète (\sim Jupiter) près ($\ll 1$ UA) de son étoile plutôt petite, deux méthodes devraient marcher :

- observation des variations périodiques de la vitesse radiale de l'étoile \rightarrow vélocimétrie
- occultation périodique partielle de l'étoile par la planète \rightarrow transit

Struve a vu juste, mais ses idées ont un faible écho car le modèle implicite des système planétaires est le système solaire : grosses planètes loin de l'étoile ...

\rightarrow encore raté, mais la découverte ne va pas tarder...

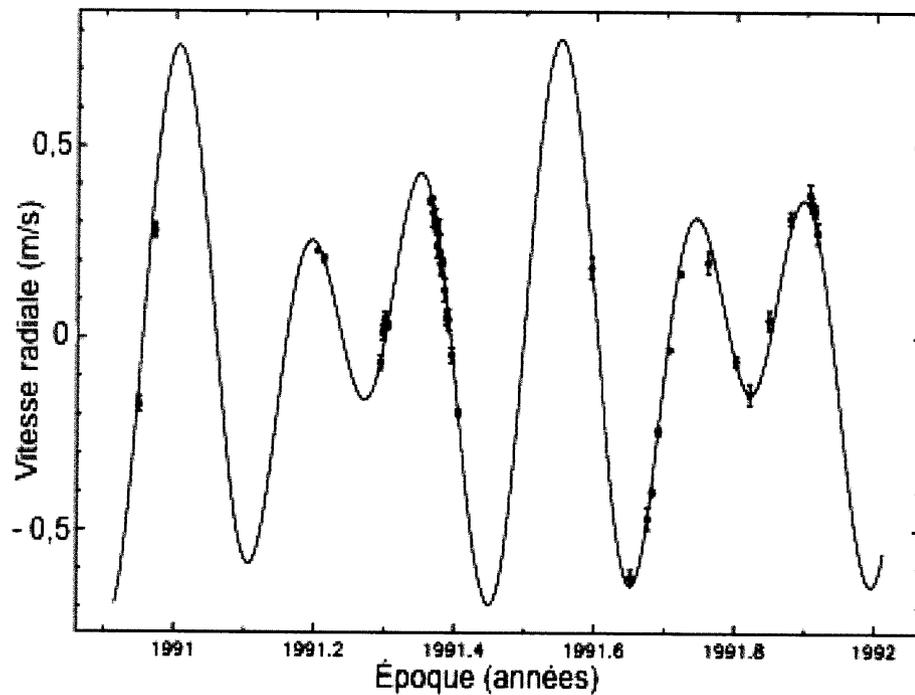
Premières détections

Les progrès de la technologie instrumentale dans les dernières décennies du 20^e siècle ont permis la détection indirecte par des méthodes physiques :

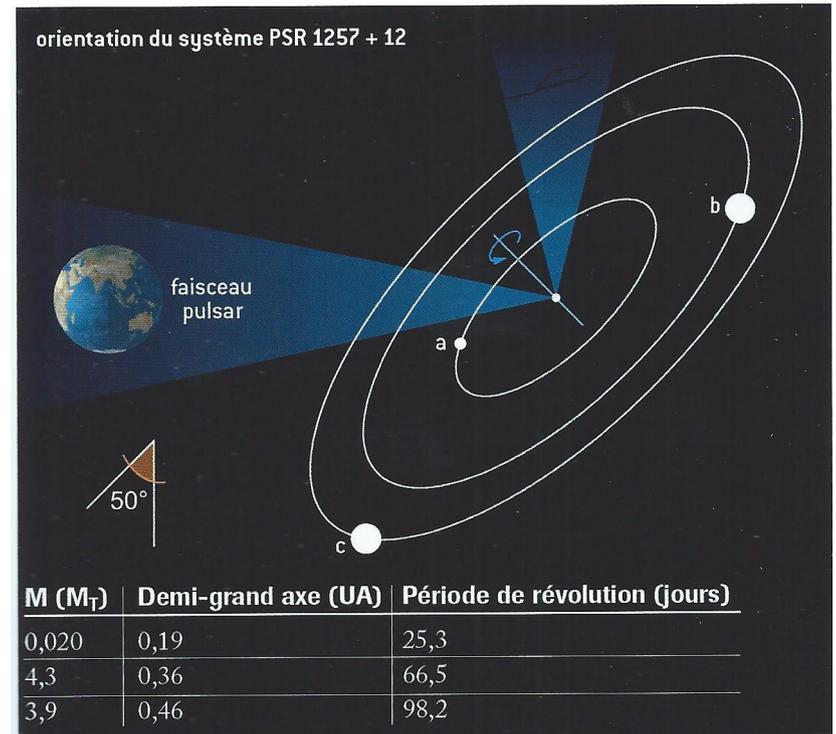
1992 : Alex. Wolszczan découvre deux planètes autour du pulsar PSR B1257+12

1995 : Michel Mayor et Didier Queloz (observatoire de Genève) découvrent la première exoplanète, gravitant autour de l'étoile 51 Peg semblable au Soleil (de type spectral G), ce qui leur vaudra le prix Nobel en 2019

Découverte de 1992 (Arecibo): le pulsar se déplace périodiquement sous l'effet gravitationnel des deux planètes (en fait il y en a trois) qui orbitent autour

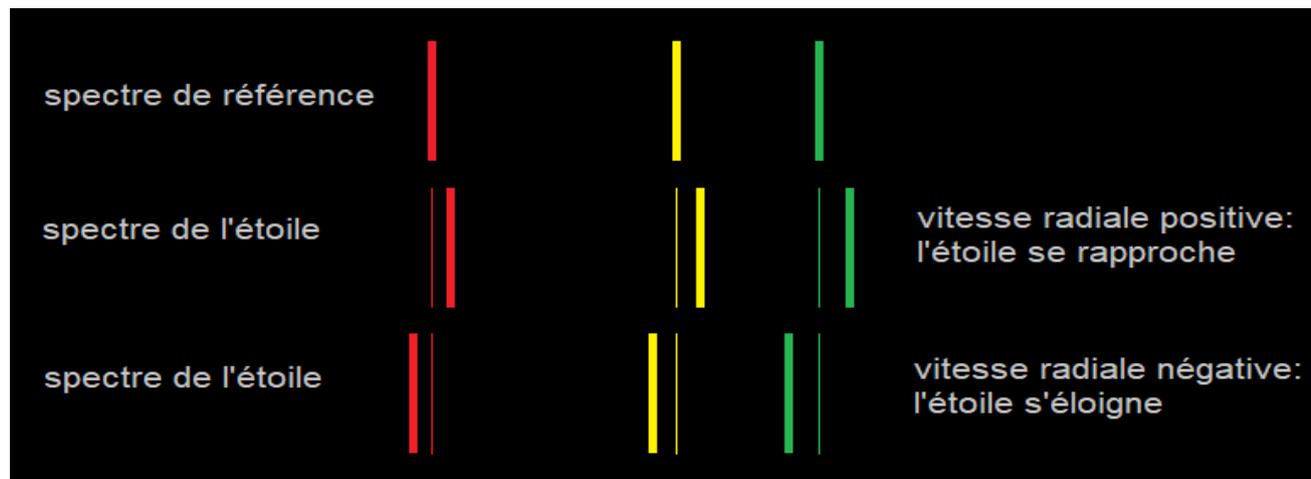
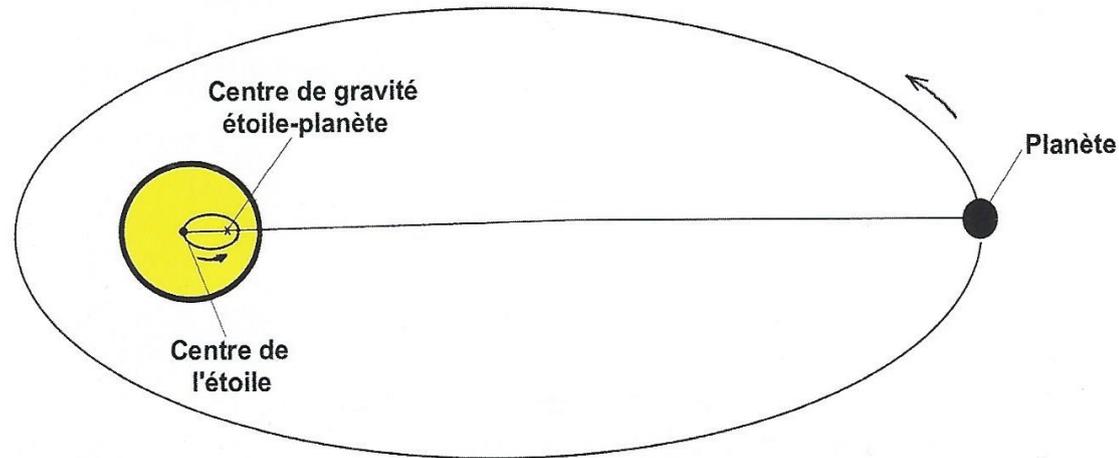


Variation périodique de la vitesse radiale – la résolution sur la vitesse est obtenue grâce au chronométrage ultra-précis du pulsar

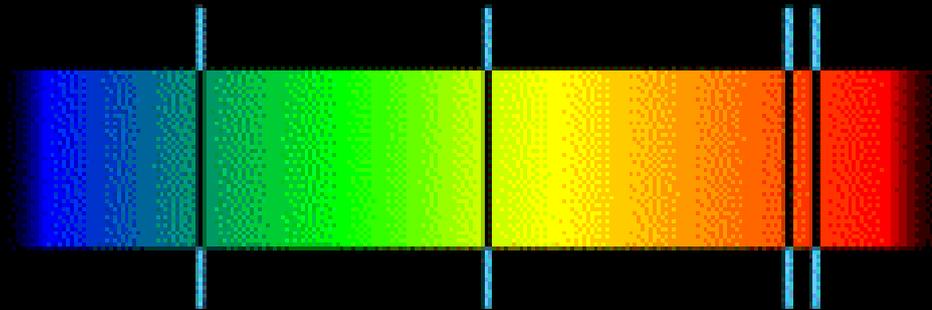
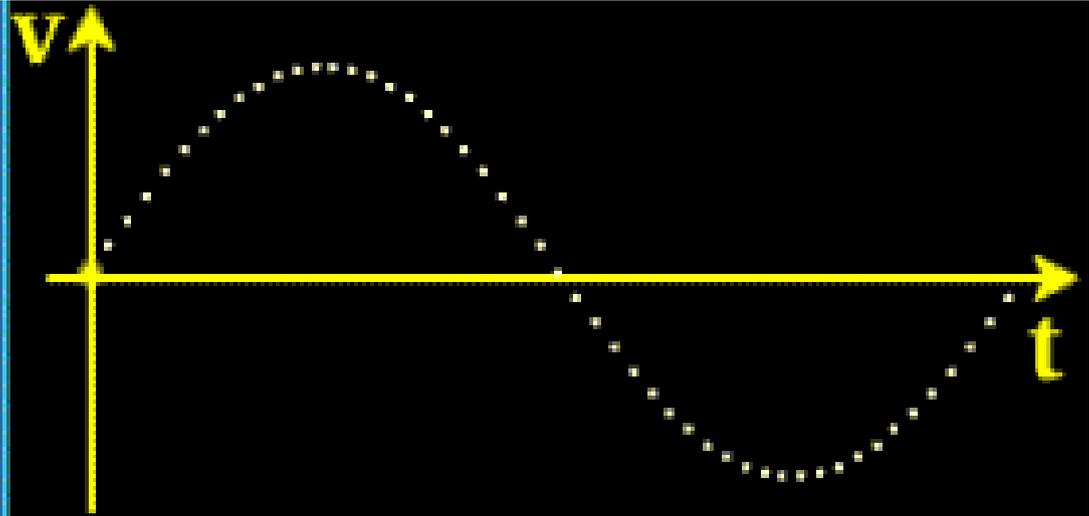


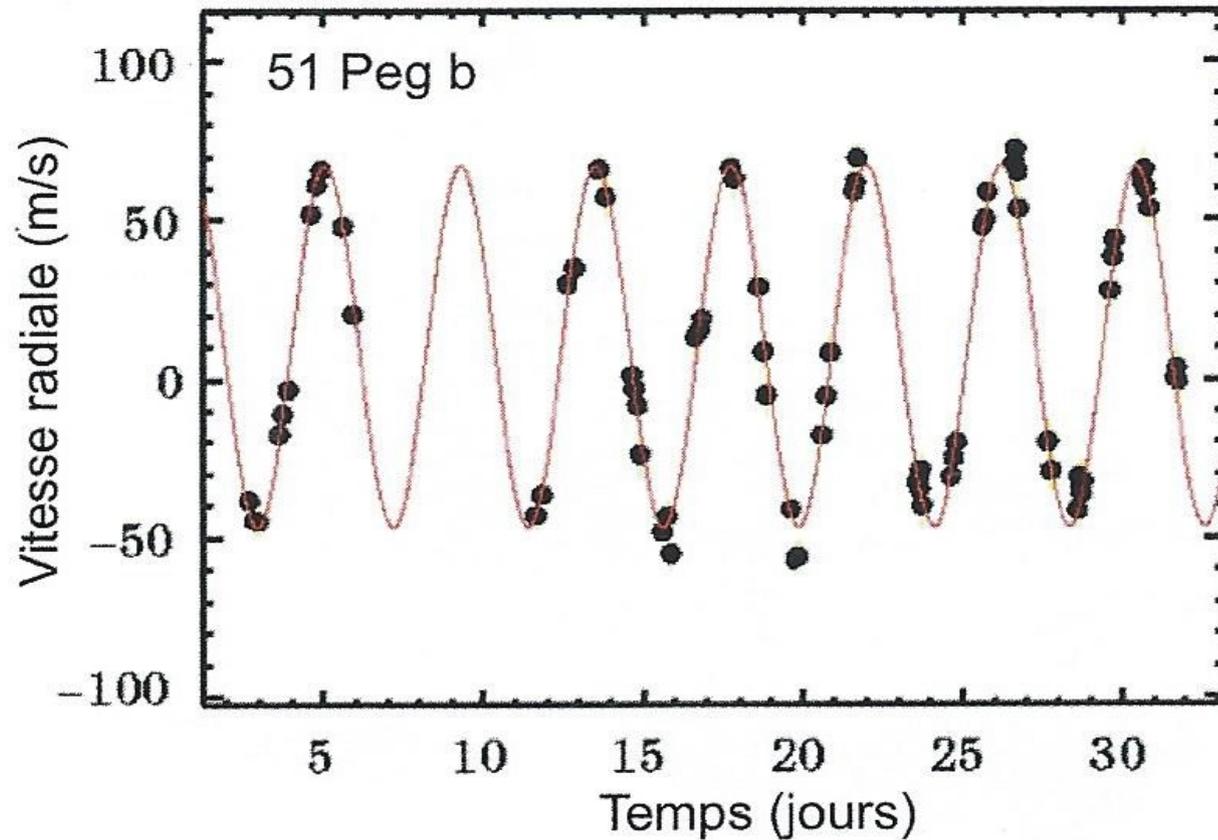
Le système PSR B1257+12 et ses trois planètes

Découverte de 1995 (Observatoire Hte Provence) :
comme dans le cas du pulsar, l'étoile se déplace
périodiquement autour du centre de masse du système



la variation de la vitesse radiale est observée sur le
spectre de l'étoile décalé par effet Doppler-Fizeau





variation périodique de la vitesse radiale de l'étoile 51 Peg observée grâce à l'effet Doppler-Fizeau sur son spectre
période : 4,23 jour

→ distance de la planète à l'étoile: 0,05 UA soit $\sim 7,5 \cdot 10^6$ km

→ masse de la planète comprise entre 0,5 et 2 x M Jupiter

« Jupiter chaud »

Comment on obtient ces caractéristiques du système étoile-planète :

- si i est l'angle d'inclinaison de l'orbite (supposée ici circulaire) de la planète sur le plan du ciel (qui est perpendiculaire à la ligne de visée), l'amplitude de la variation de vitesse radiale de l'étoile s'écrit :

$$\Delta v = (2 \pi G / T)^{1/3} M^{2/3} m \sin i$$

T période de révolution, M masse de l'étoile, m masse de la planète
en rapportant aux grandeurs caractéristiques du système solaire :

$$\Delta v = 28,4 \text{ m/s } T_{\text{an}}^{1/3} M_{\text{M}\odot}^{-2/3} m_{\text{MJ}} \sin i$$

la masse de l'étoile M est estimée à partir de son type spectral

comme i est inconnu et $\sin i \leq 1$ on obtient une valeur minimale de la masse de la planète, « exacte » si l'orbite est vue par la tranche

- La troisième loi de Kepler donne le rayon a de l'orbite planétaire :

$$a_{\text{ua}}^3 = M_{\text{M}\odot} T_{\text{an}}^2$$

Les instruments de la découverte de 1995



Télescope de 193 cm
 observatoire Saint-Michel de
 Provence (altitude 650 m)
 mis en service en 1958

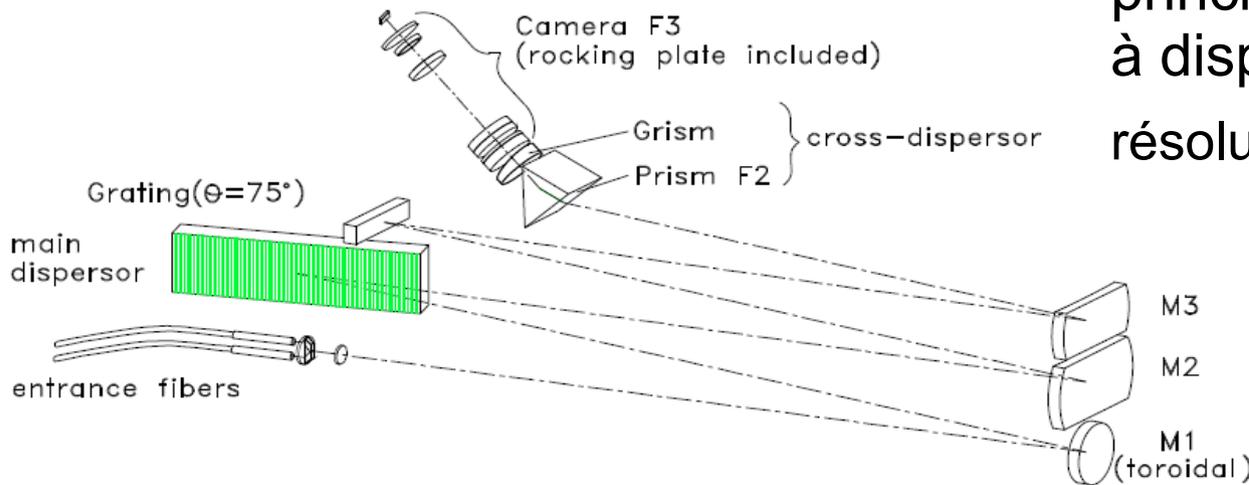
foyer Cassegrain utilisé ici :
 distance focale 28,6 m
 → ouverture f/15
 échelle au foyer : 150 μm / " angle

principe du spectrographe ELODIE
 à dispersion croisée

résolution spectrale $\lambda/\Delta\lambda = 40000$

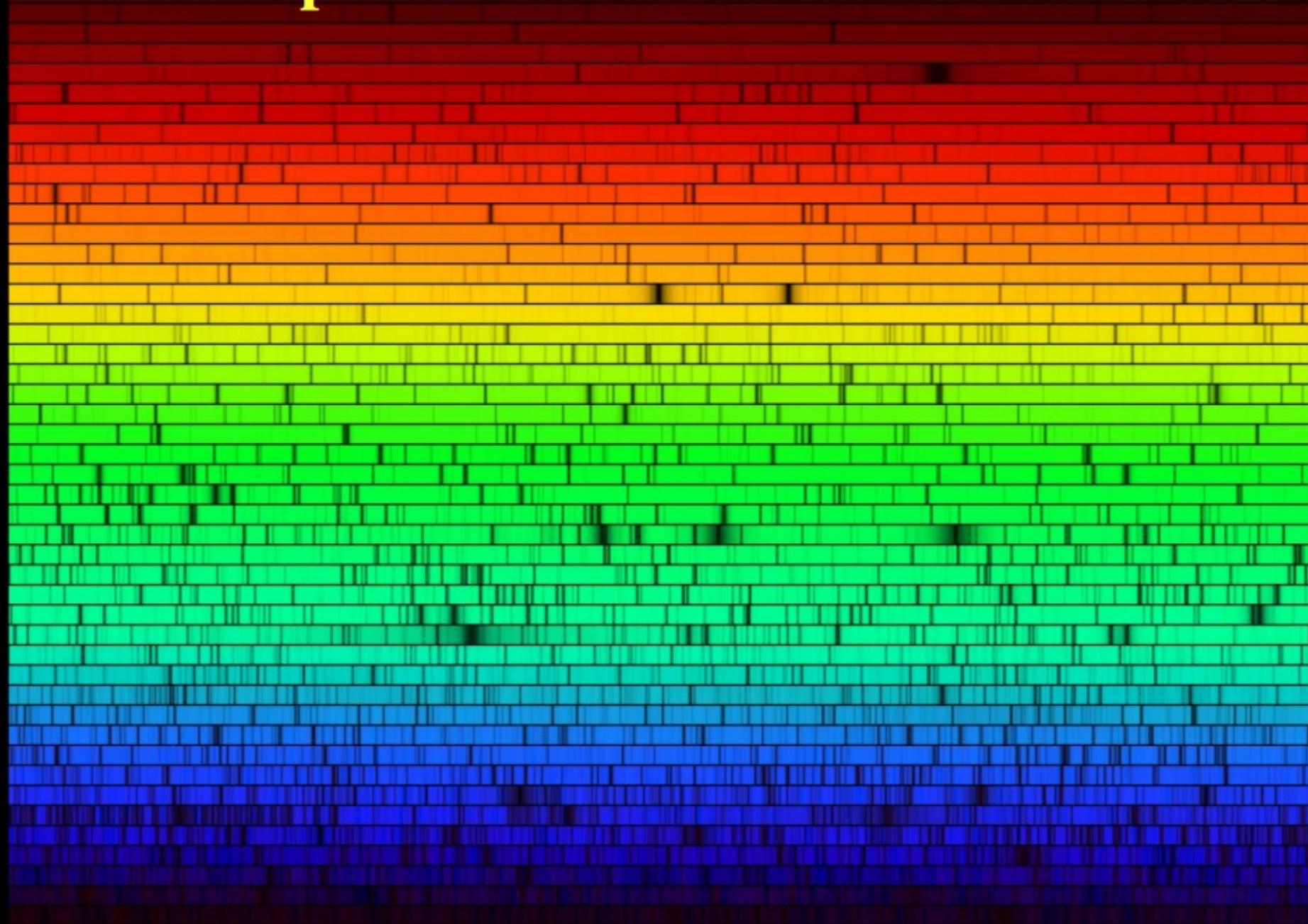
noter : $\Delta\lambda/\lambda = 0,00000003$
 pour $v = 10 \text{ m/s}$

→ traitement supplémentaire
 par corrélation nécessaire



traitement en aval : corrélation sur 5000 lignes spectrales → précision v. rad. 13 m/s

Solar Spectrum Taken With An Echelle



Les succès de la vélocimétrie

plus de 700 exoplanètes découvertes grâce à :

- spectrographes à dispersion croisée à hautes performances : précision en vitesse radiale meilleure que 1m/s
- couplage des spectrographes avec de grands télescopes :
Keck, Hawaï (10m, spectro. HIRES)
La Silla (ESO), Chili (3,5m, spectro. HARPS)

complète et valide les autres méthodes (transits, ...)

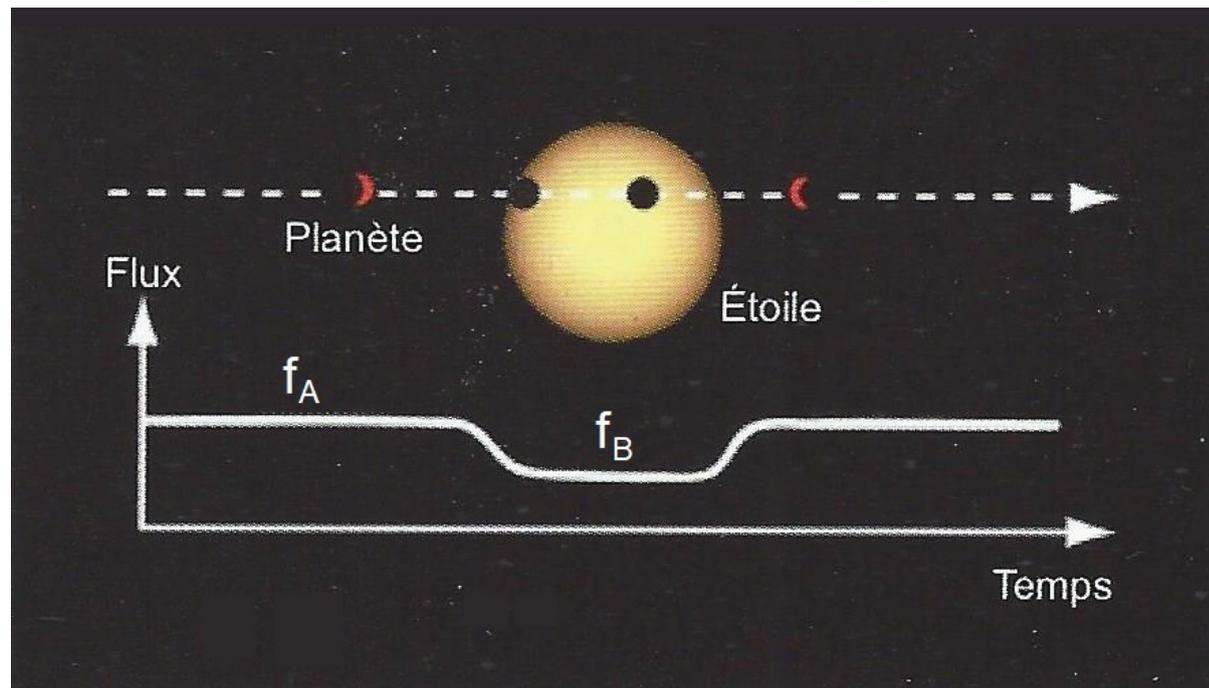
- estimation de la masse des exoplanètes
- forme de la courbe de vitesse → mesure de l'excentricité de l'orbite

des spectrographes ultra-performants équiperont les télescopes géants en projet : E-ELT (ESO, 39m), TMT (30m), GMT (21m)

→ découvertes en perspective : « Terres » habitables autour d'autres Soleils ...

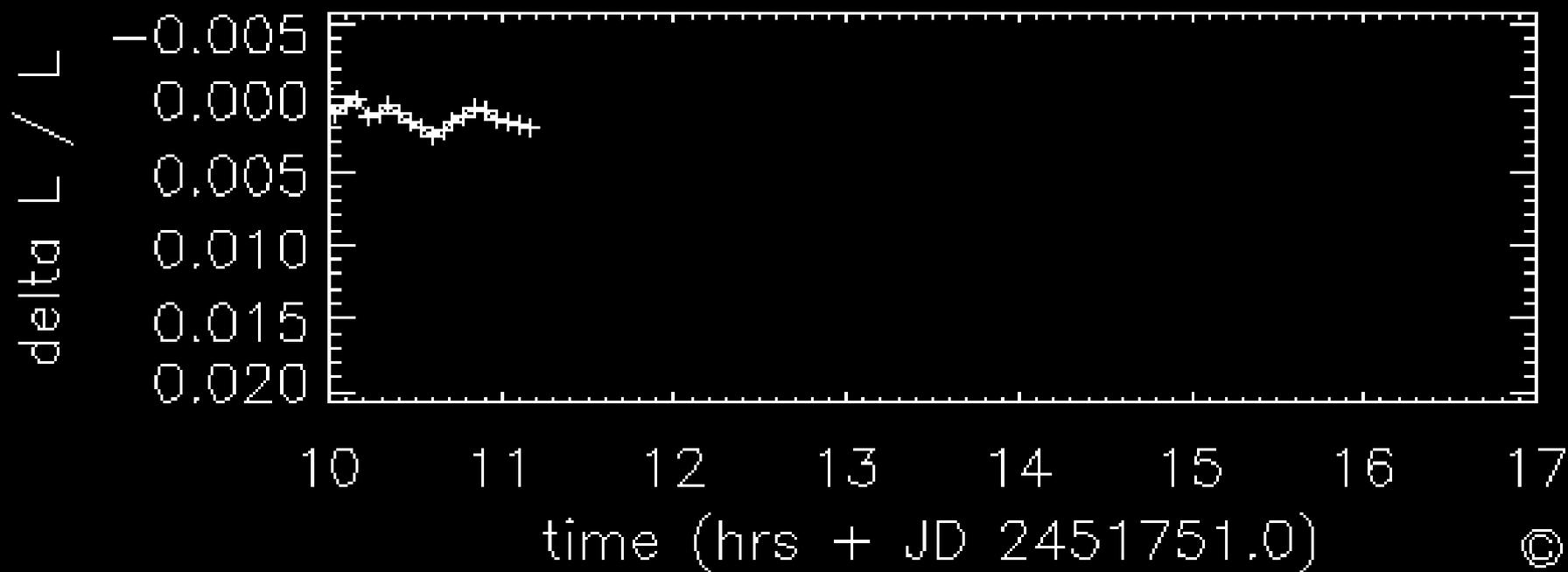
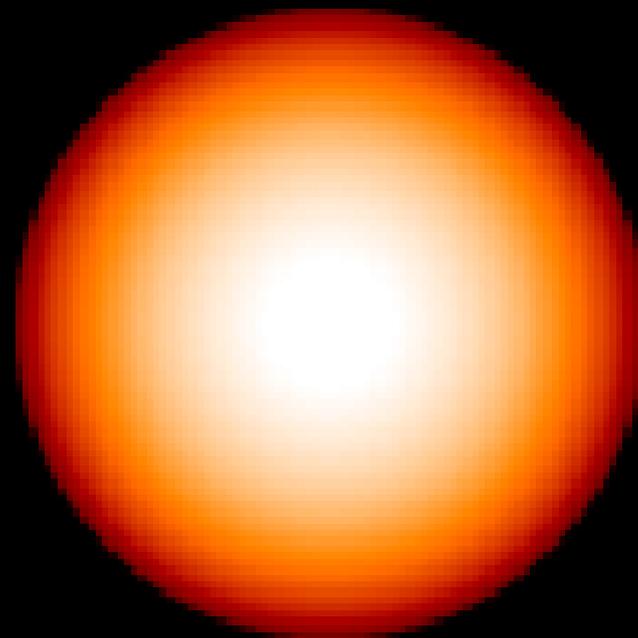
La méthode des transits

Principe simple : le passage de la planète devant l'étoile produit une diminution de sa luminosité apparente :



La diminution du flux (= luminosité) dépend du rapport des rayons de l'étoile R et de la planète r :

$$f_B = f_A \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad \text{ex : } \sim \text{Soleil et } \sim \text{Jupiter : } f_B \approx 0,99 f_A$$



L'observation de transits successifs fournit :

- la période de révolution de la planète
- le rayon r de la planète si on connaît celui de l'étoile (à partir de sa distance, sa luminosité et son type spectral)
- la masse m de la planète à partir des données vélocimétriques : on voit le système par la tranche, donc $\sin i \approx 1$
 - densité de la planète : m / V avec $V = 4/3 \pi r^3$
 - type de la planète : rocheuse, glacée ou gazeuse

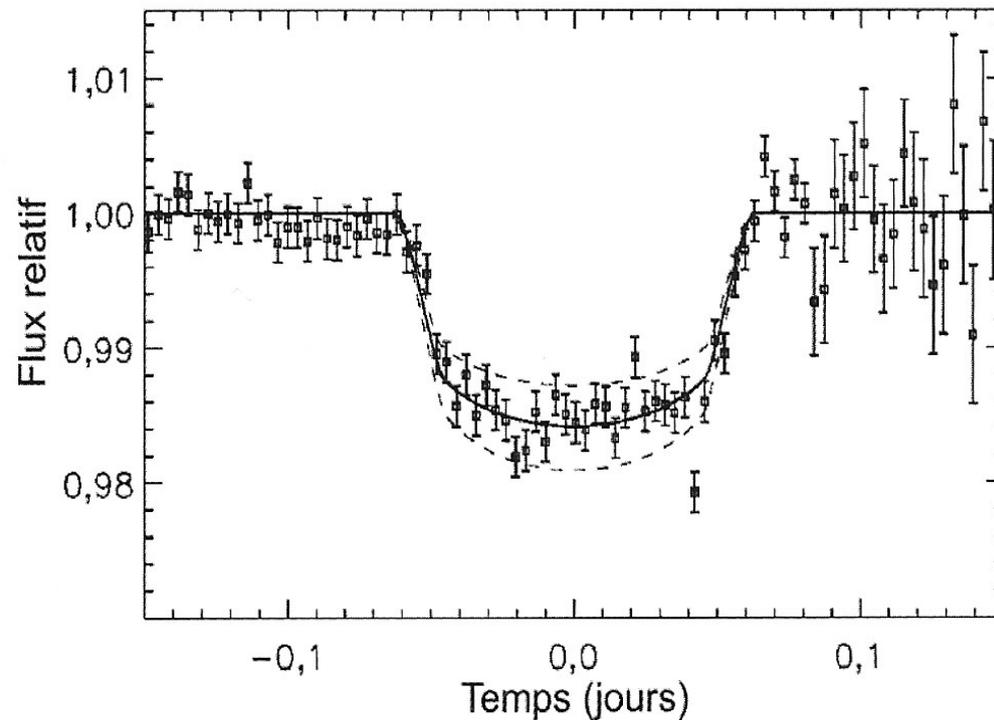
Contraintes :

- la luminosité de l'étoile doit être stable
- le système doit être vu par la tranche ($i \approx 90^\circ$)
 - bon pour les grosses planètes près de leur étoile
 - mais faible probabilité de détection pour les petites planètes loin de leur étoile

Première détection par transit en 1999 : HD 209458b

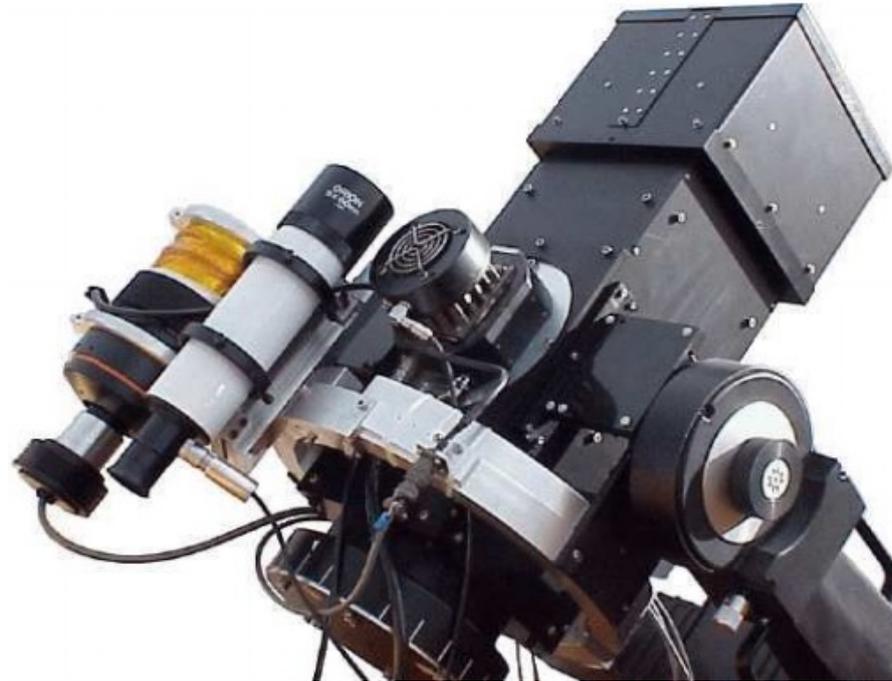
(G. Henry ; D. Charbonneau, STARE project)

« Jupiter chaud » : planète géante orbitant très près de son étoile de type solaire, distance au Soleil ≈ 47 pc



$r \approx 1,27 r_{\text{Jup}}$ $m \approx 0,63 m_{\text{Jup}}$ période 3,5 jours rayon orbite $\approx 0,047$ UA

HD 209458b : observable par les amateurs avertis ...

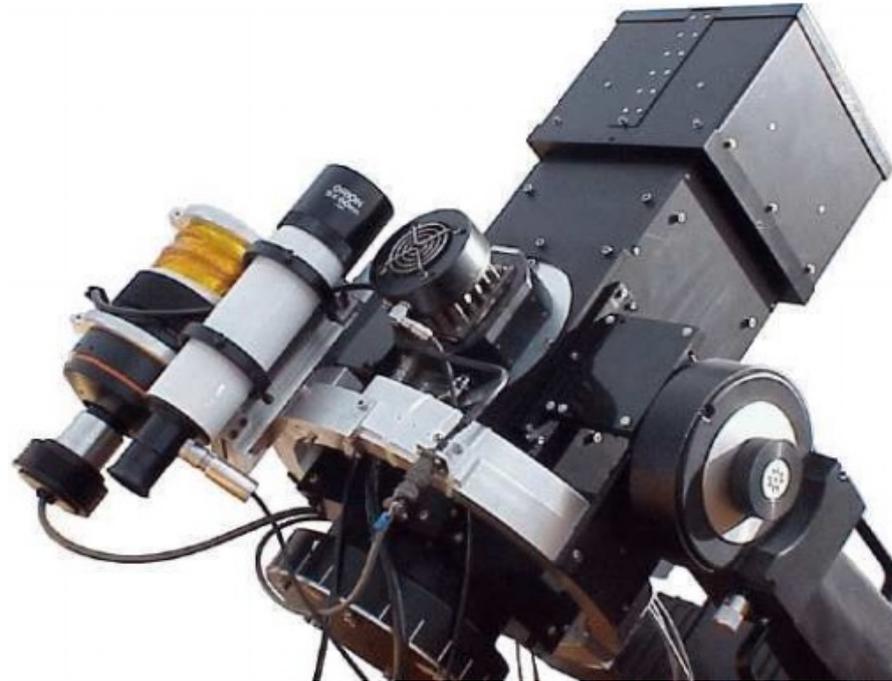


télescope du projet STARE : Schmidt longueur focale 286 mm
ouverture 98 mm (f/2,9)

champ $6^\circ \times 6^\circ$ imagé par CCD 2034 x 2034 px taille px 15 μm
+ traitement d'image

voir article Charbonneau & Coll., ApJ 529-L45, 2000

HD 209458b : observable par les amateurs avertis ...



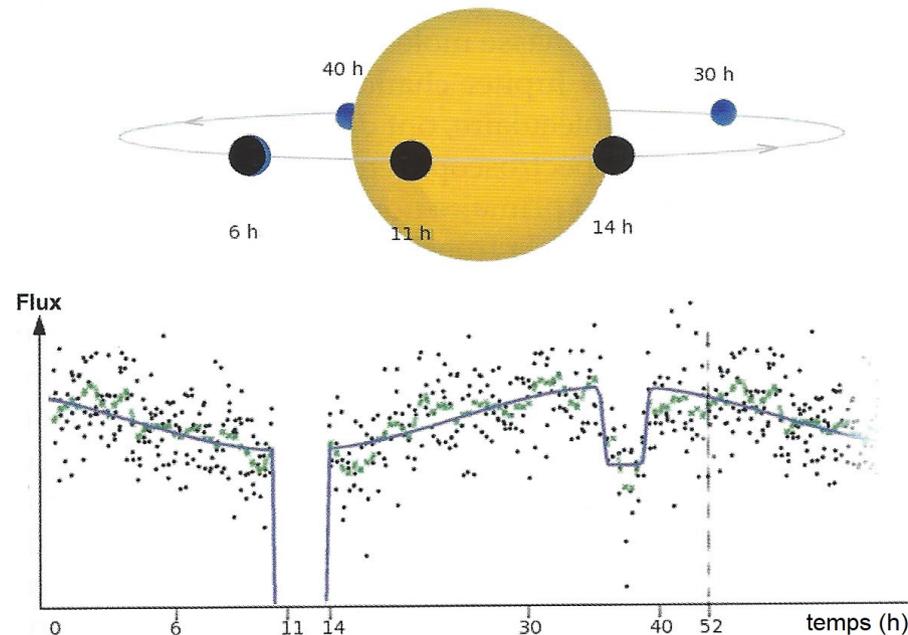
télescope du projet STARE : Schmidt longueur focale 286 mm
ouverture 98 mm (f/2,9)

champ 6° x 6° imagé par CCD 2034 x 2034 px taille px 15 µm
+ traitement d'image

voir article Charbonneau & Coll., ApJ 529-L45, 2000

Transits primaire et secondaire

L'observation d'une révolution complète montre le passage de la planète devant l'étoile (transit primaire) et derrière l'étoile (transit secondaire)

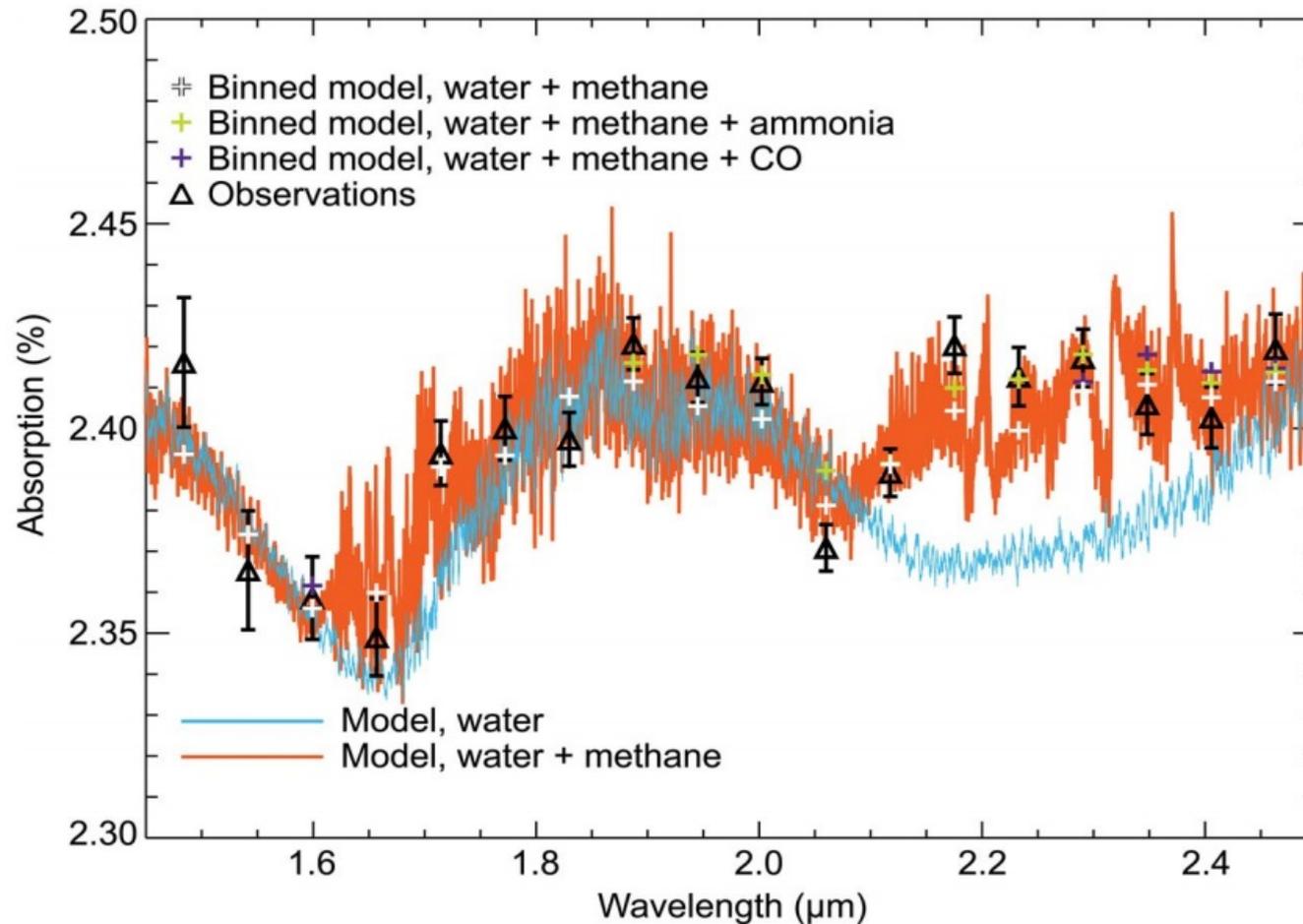


transit primaire : spectroscopie en transmission

transit secondaire : spectroscopie en émission (IR)

→ température de surface et caractéristiques de l'atmosphère planétaire accessibles (depuis l'espace)

Observation de l'atmosphère du Jupiter chaud HD189733b par spectroscopie en transmission - HST caméra NICMOS - 2008



- Les mesures correspondent au modèle d'atmosphère eau + méthane
- modèle amélioré par traces d'ammoniac ou de monoxyde de carbone (CO)
 - impact spectral de l'eau limité \rightarrow dynamique spectrale nécessaire $1 / 10^{-4}$

Contraintes des observations photométriques depuis le sol :
précision limitée (10^{-3}), continuité des mesures perturbée par la rotation de la Terre

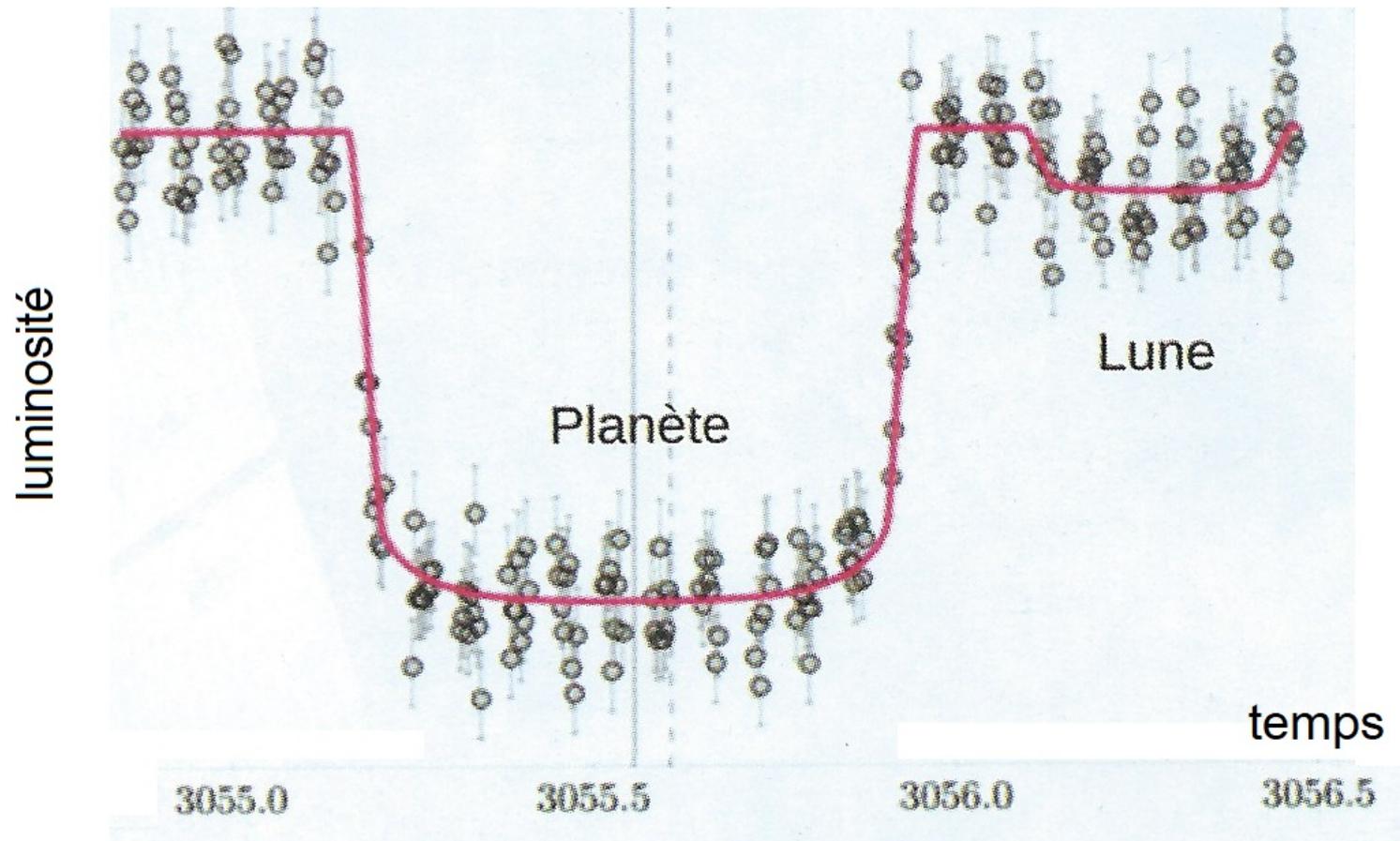
→ solution : observer depuis l'espace : précision photométrique $> 10^{-4}$, continuité des observations

- Mission CoRoT (CNES, Europe ; 2006-2014) adaptée à la détection de planètes plutôt près de leur étoile
32 exoplanètes découvertes : super-Terre chaude (CoRot-7b) , Jupiter froid (CoRot-9b), gros Jupiter chaud (orbite en 3 jours), etc
- Mission Kepler (NASA ; 2009-2018), très fructueuse : plus de 2600 exoplanètes découvertes : super-Terres / mini-Neptunes, exo-Terres, systèmes à plusieurs planètes ...

animation : <https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>

→ les planètes de taille $<$ Neptune sont les plus fréquentes

→ la probabilité qu'une étoile de la Galaxie possède au moins une planète est évaluée à plus de 50%

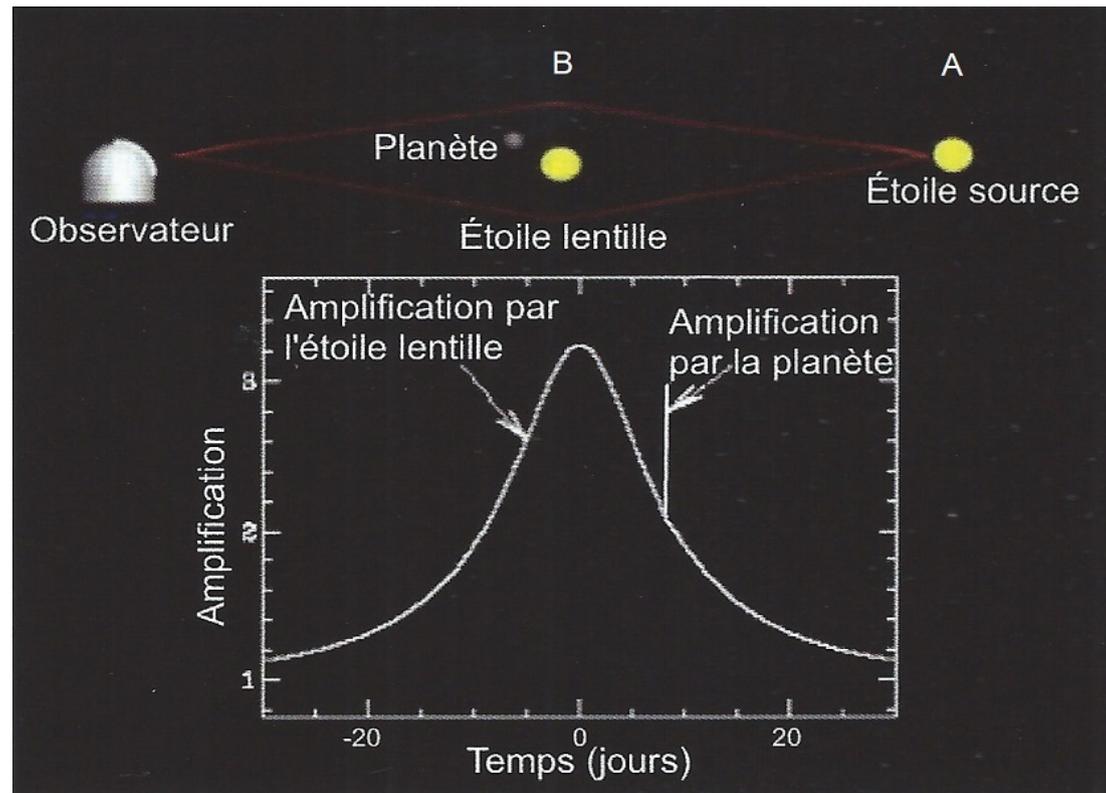


double transit remarquable : l'exoplanète Kepler 1625 b (« Jupiter froid ») et sa « lune », presque aussi grosse qu'elle (2/3), probablement une autre planète capturée

observation HST en Octobre 2017 (Teachey & Coll., voir *L'Astronomie* 122 p. 15)

Détection par transit gravitationnel (*micro-lensing*)

Application de la théorie de la RG d'Einstein : les corps massifs dévient les rayons lumineux passant à proximité



La lumière de l'étoile source A est momentanément amplifiée par l'effet de lentille de l'étoile B. Si celle-ci possède une planète, un pic étroit apparaît lorsque la planète passe devant l'étoile A et amplifie sa lumière par le même effet de lentille.

Première découverte par micro-lensing en 2004 : Jupiter froid à 3 ua de son étoile, située à 5 kpc

plusieurs dizaines d'exoplanètes découvertes par cette méthode (programme OGLE)

avantages et limites de la méthode :

- très sensible : permet la détection de petites planètes du type de la Terre pouvant être loin de leur étoile
- l'étoile peut être loin de nous: plusieurs kpc
- mais observation non répétitive : il ne faut pas la rater...
→ complémentaire des méthodes vues précédemment

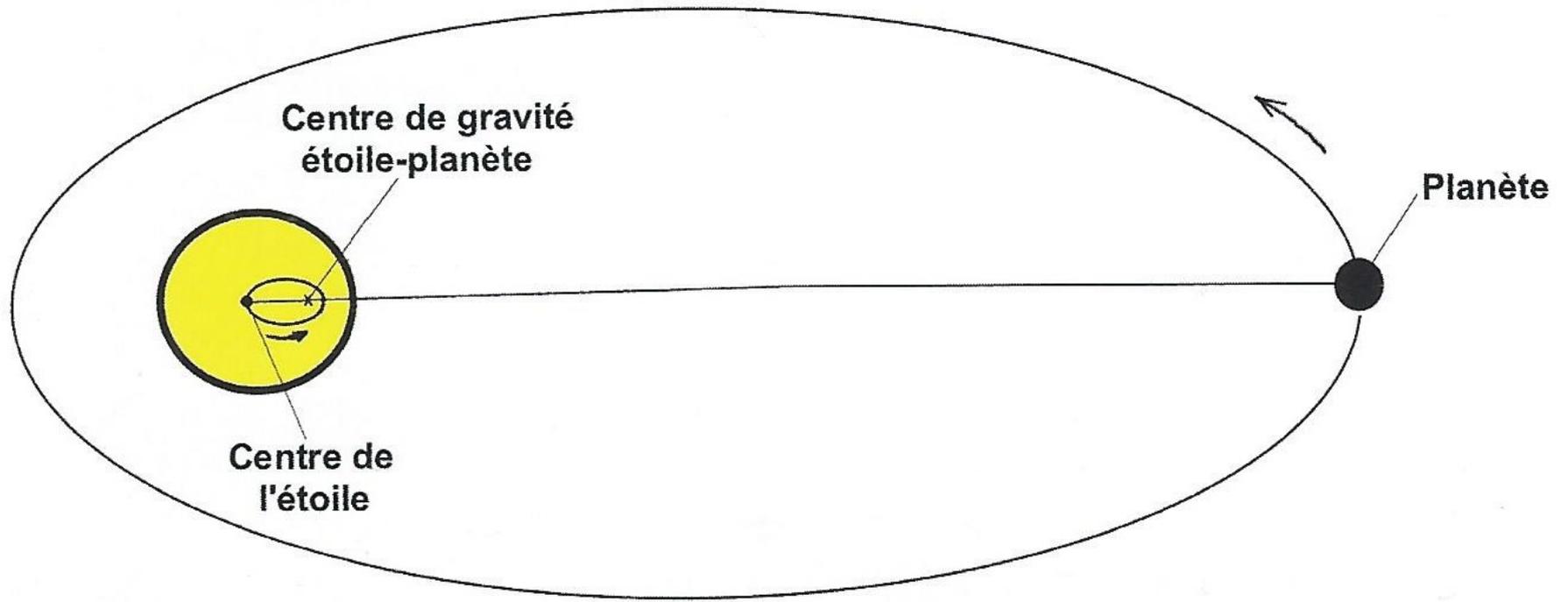
missions spatiales devant contribuer à la découverte de nouvelles exoplanètes par micro-lensing :

EUCLID (ESA) lancement prévu en 2022

WFIRST (NASA) lancement prévu en 2025

Détection par astrométrie

observer les changements de position de l'étoile-hôte



difficulté de l'astrométrie : l'orbite de l'étoile est un très petit objet vu de la Terre

rayon de l'orbite terrestre (1 u.a.) : 1 seconde d'angle vu de 1 parsec (3,26 AL)

~ limite de visibilité (seeing) depuis la Terre (turbulence atmosphérique)

→ observation depuis le sol possible grâce à :

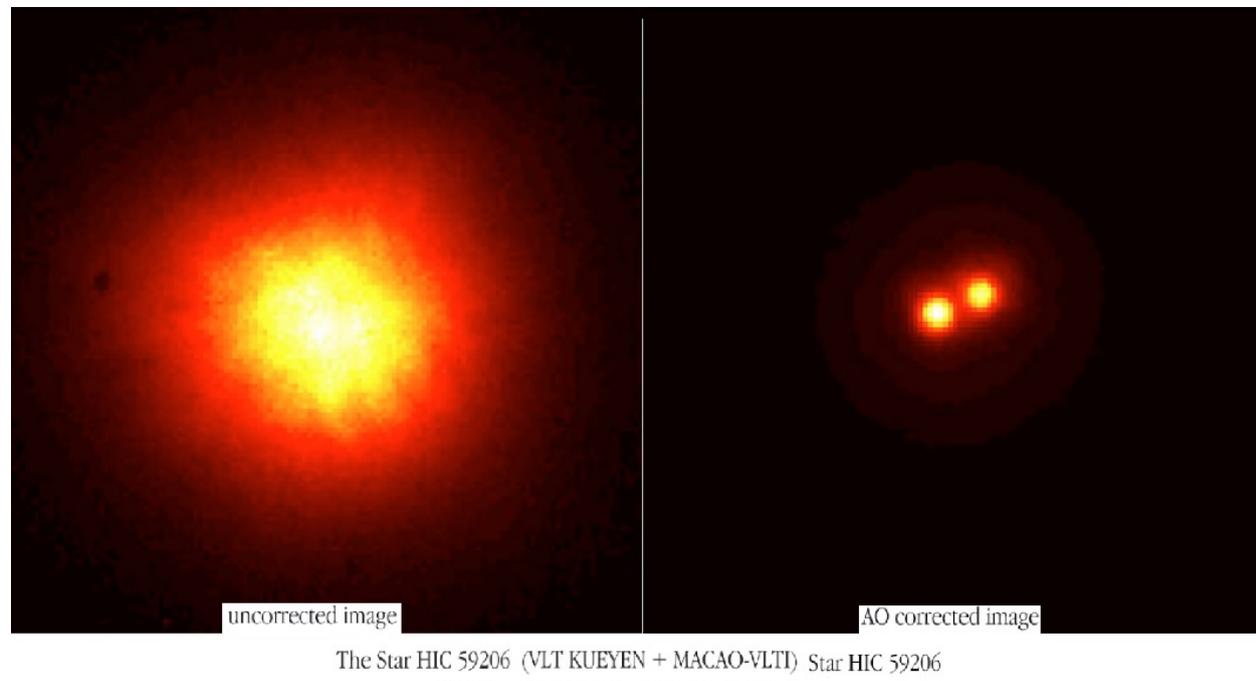
- l'optique adaptative, qui permet de s'approcher de la résolution théorique des instruments
- l'interférométrie optique à grande base (compliqué...)

→ observation depuis l'espace : sondes dédiées à l'astrométrie de précision : GAIA précision 10^{-5} "

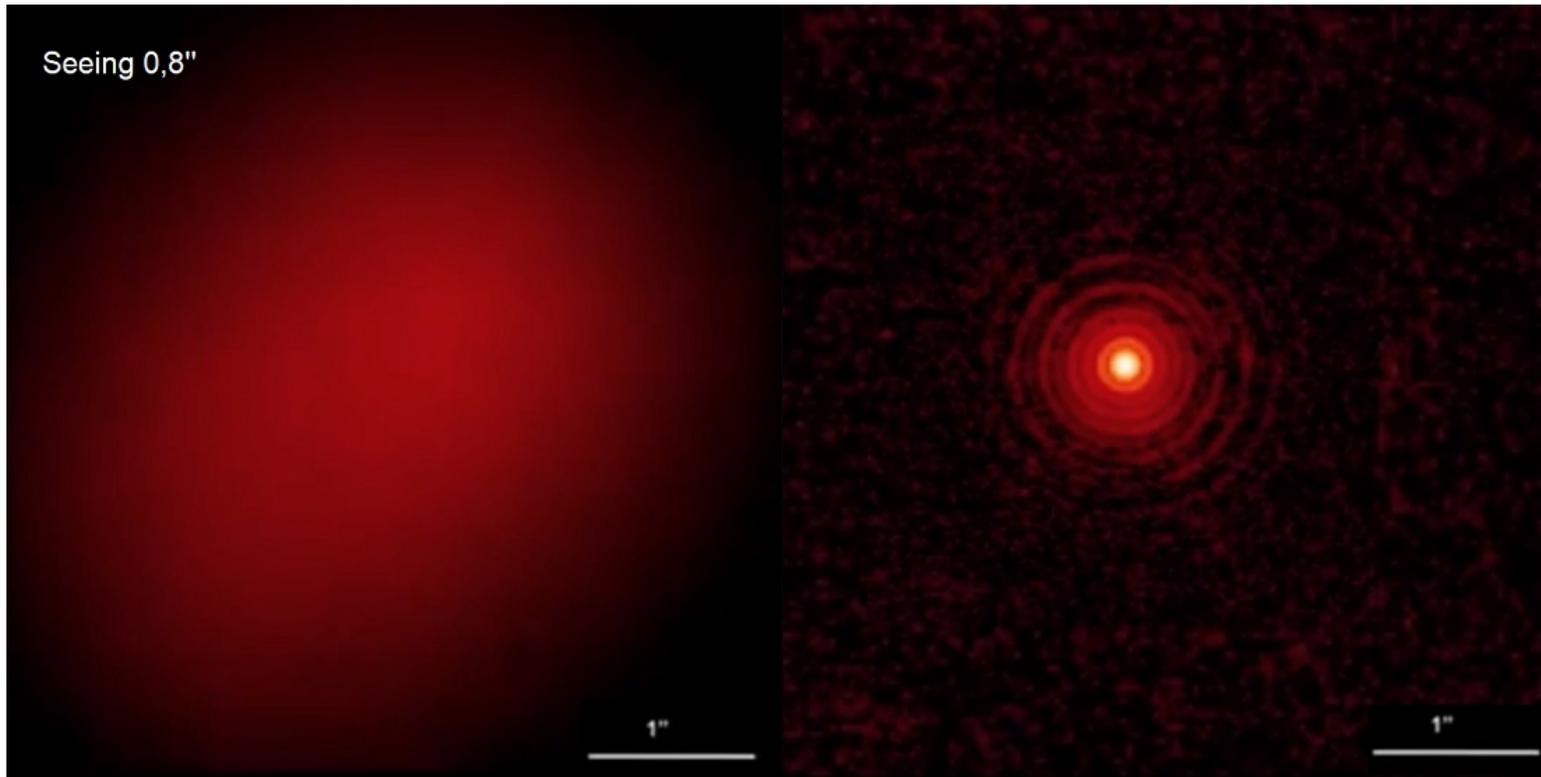
l'optique adaptative (Pierre Léna)

principe : corriger le front d'onde perturbé par la turbulence atmosphérique au moyen d'un miroir intermédiaire déformable actionné en temps réel

mesure de référence sur une étoile dans le champ d'observation ou sur une « étoile artificielle »



efficacité spectaculaire ...



La PSF (fonction de pupille d'Airy) est nettement visible sur l'image de droite ~ limite théorique de résolution de l'instrument
VLT + SPHERE

Observation directe des exoplanètes

C'est difficile car :

- l'étoile est en général beaucoup plus lumineuse que la planète → masquage par éblouissement de l'instrument
- vue de la Terre, la planète est très proche de l'étoile : on est en-dessous de la limite de visibilité

mais possible grâce à deux « astuces » techniques :

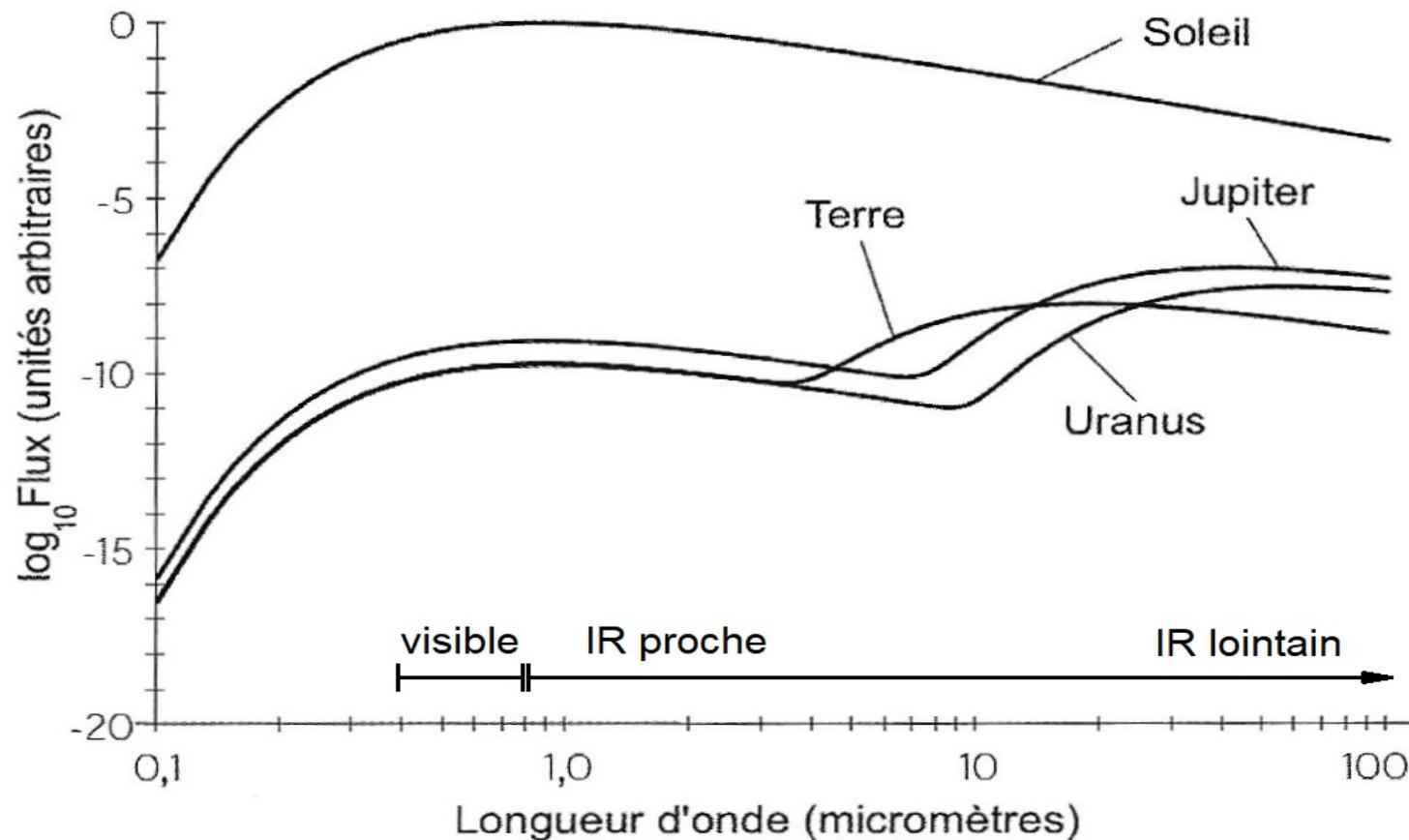
- l'utilisation de coronographes pour masquer la lumière de l'étoile
- l'optique adaptative

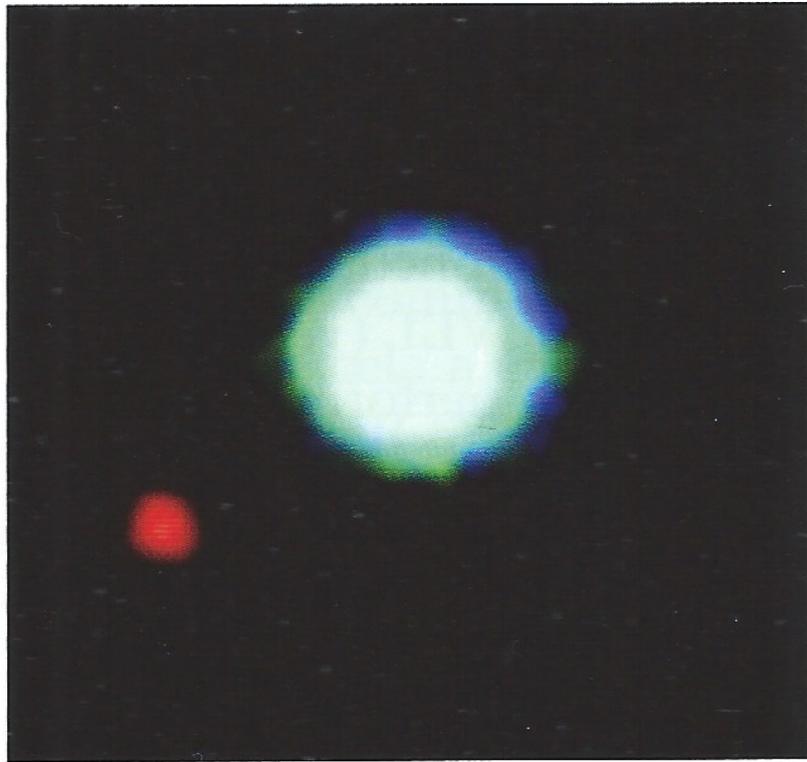
ces deux techniques sont combinées dans des instruments performants tel SPHERE (ESO)

- L'observation depuis l'espace permet de s'affranchir de la limite de visibilité et de profiter du moindre masquage en IR

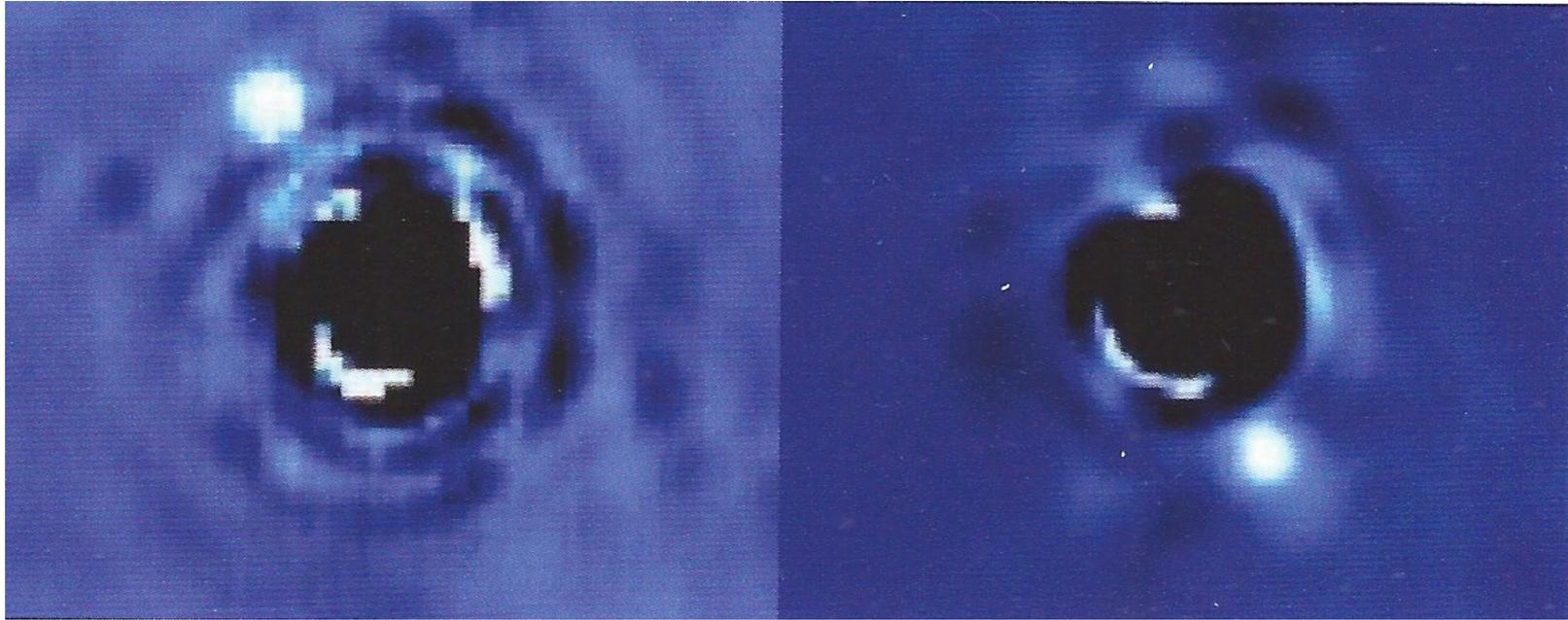
le contraste des luminosités planète / étoile est souvent meilleur en infra-rouge

exemple du système solaire :





première détection d'une exoplanète par imagerie directe IR
VLT (ESO), instrument NACO (optique adaptative), 2005
étoile hôte : 2M1207-39 naine brune $0,025 M_{\odot}$
planète $\sim 4 M$ Jupiter distance à l'étoile 55 u.a.



Oct. 2003

Nov. 2009

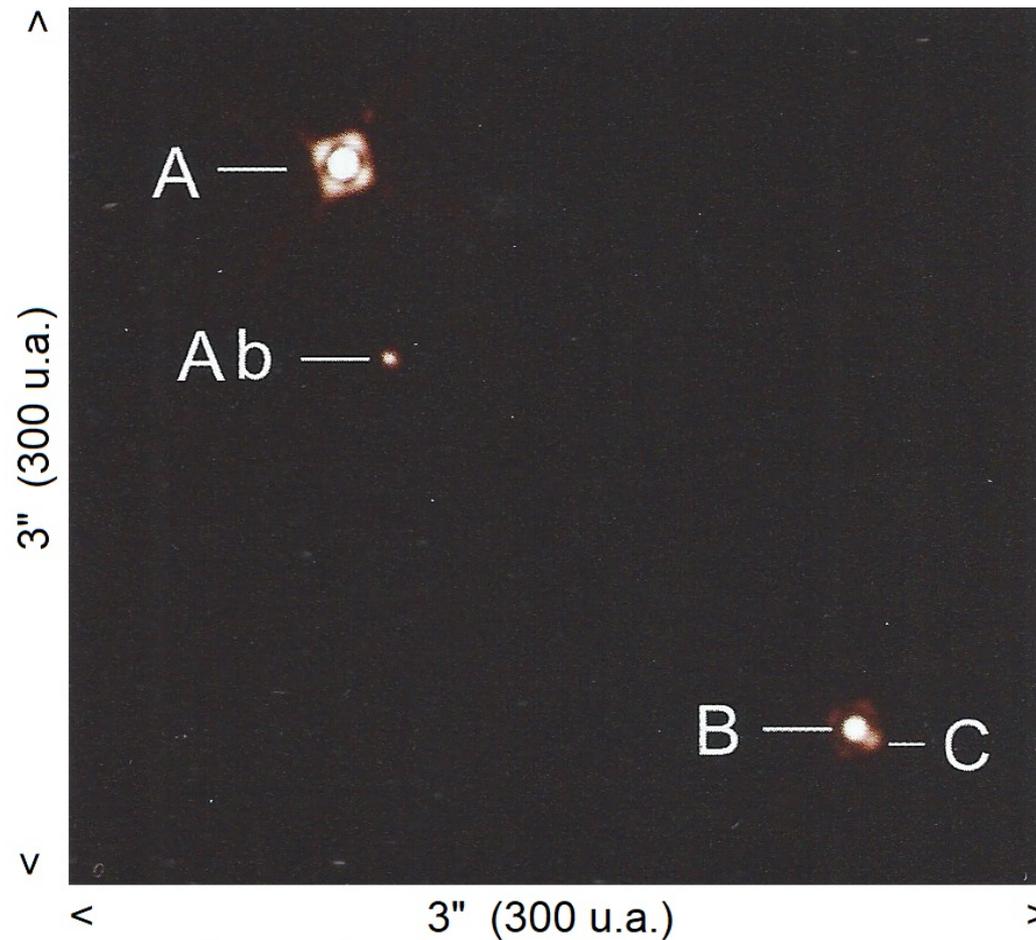
Observation directe de la planète autour de l'étoile β Pictoris à deux périodes espacées de 6 ans - VLT NACO + coronographe

distance étoile - planète ~ 8 u.a. masse planète ~ 7 M Jup.

distance étoile à la Terre 19,3 pc luminosité étoile ~ 9 x Soleil

animation 2013-2018 *Gemini Planet Imager Exoplanet Survey*

lien [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta_Pictoris_b_orbit_animated_\(2013-2018\).gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta_Pictoris_b_orbit_animated_(2013-2018).gif)



système stellaire triple HD 131399 A B C (jeune : 16 M an) :
 l'orbite de l'exoplanète Ab autour de l'étoile A est perturbée par
 les étoiles B et C → comportement potentiellement chaotique

la planète Ab est 200000 fois moins lumineuse que l'étoile A
 masse ~ 4 M Jupiter température ~ 850 K

VLT + instrument SPHERE image infra-rouge (Wagner & Coll. 2016)

Détection par émissions radio

Les émissions aurorales en décamétrique offrent un rapport de luminosité planète / étoile favorable

ex : Jupiter ~ Soleil

les nouveaux radiotélescopes super-sensibles tels que SKA (et LOFAR ?) pourraient apporter de nouvelles découvertes intéressantes

existence d'une magnétosphère → condition favorable pour l'apparition et le développement de la vie

missions spatiales dédiées en cours et en préparation

- élargir le champ exploré, voire à toute la sphère céleste
- peuvent être dédiées à certains types d'exoplanètes
- typ. missions « moyennes » de coût ~ 300 M \$ / M Euro, phase primaire ~ 2 ans puis poursuite « à la carte »

GAIA (ESA, 2013) astrométrie de précision, généraliste

TESS (NASA, 04/2018) Transiting Exoplanet Satellite
particulièrement planètes telluriques

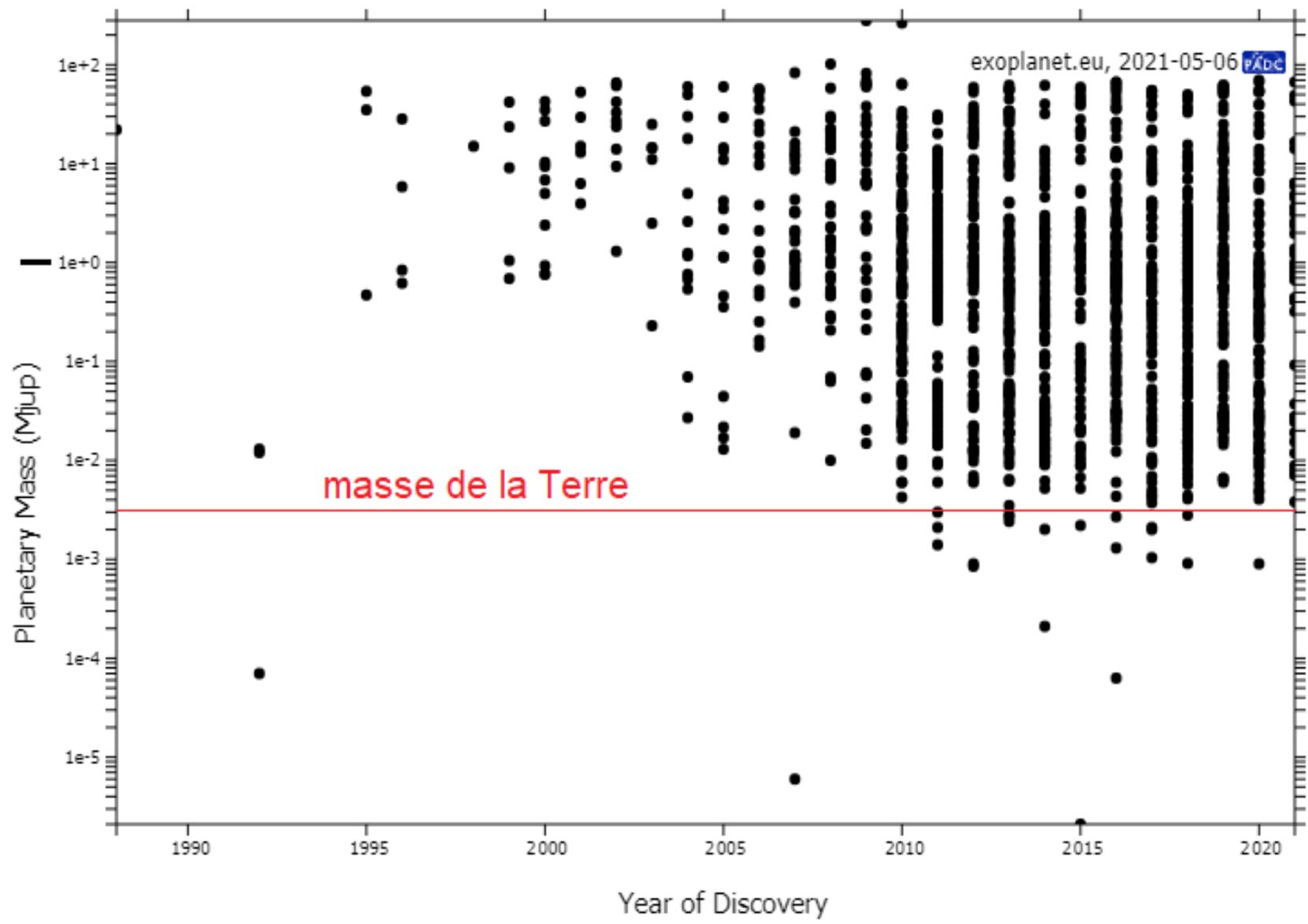
CHEOPS (ESA + CH, 12/2019) CHaracterising ExOPlanet Satellite
observation par transits

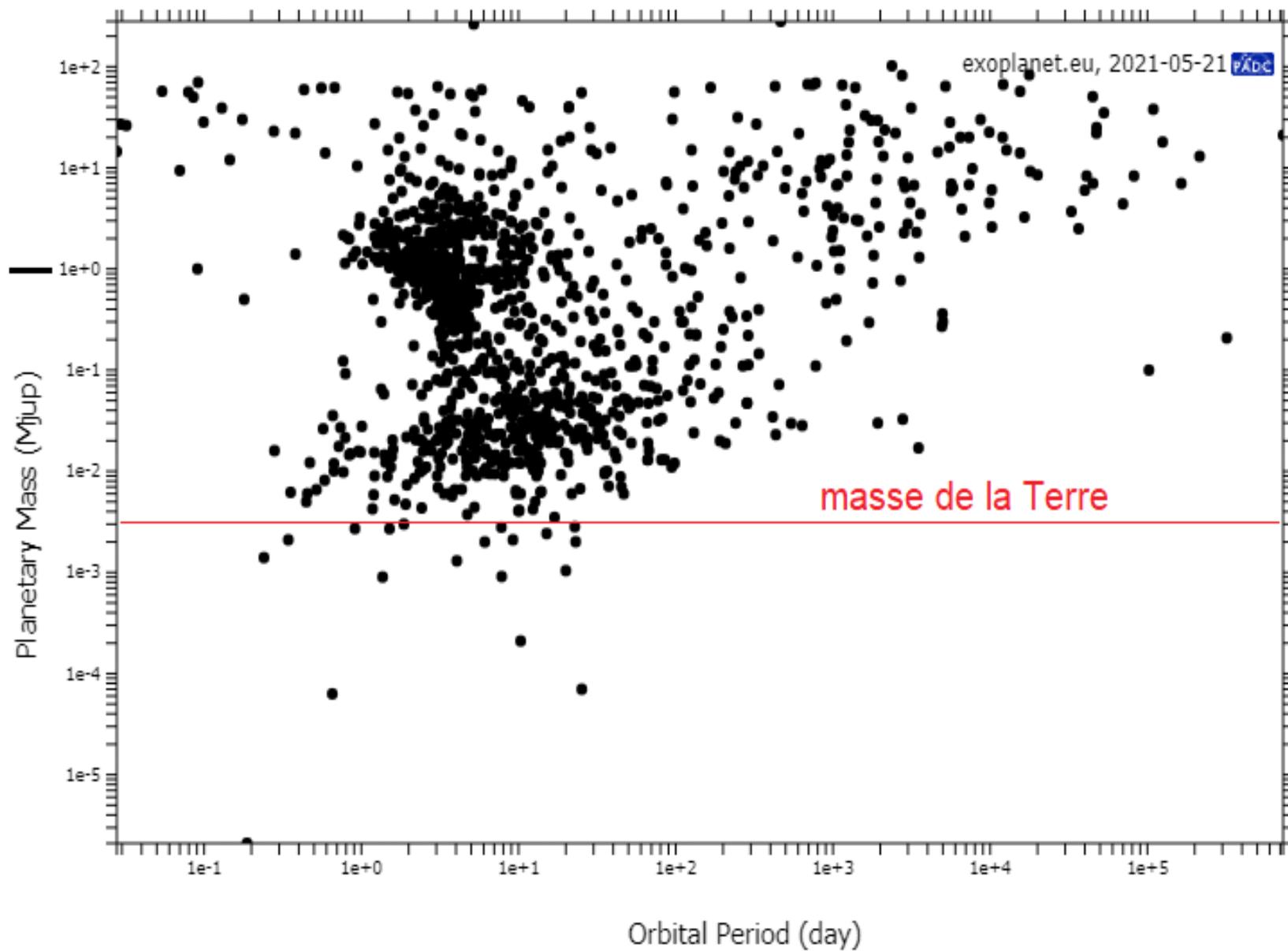
PLATO (ESA, lancement prévu en 2026) : caractérisation par photométrie de précision (transits) de systèmes exoplanétaires avec étoiles brillantes, 26 mini-télescopes à grand champ couplés

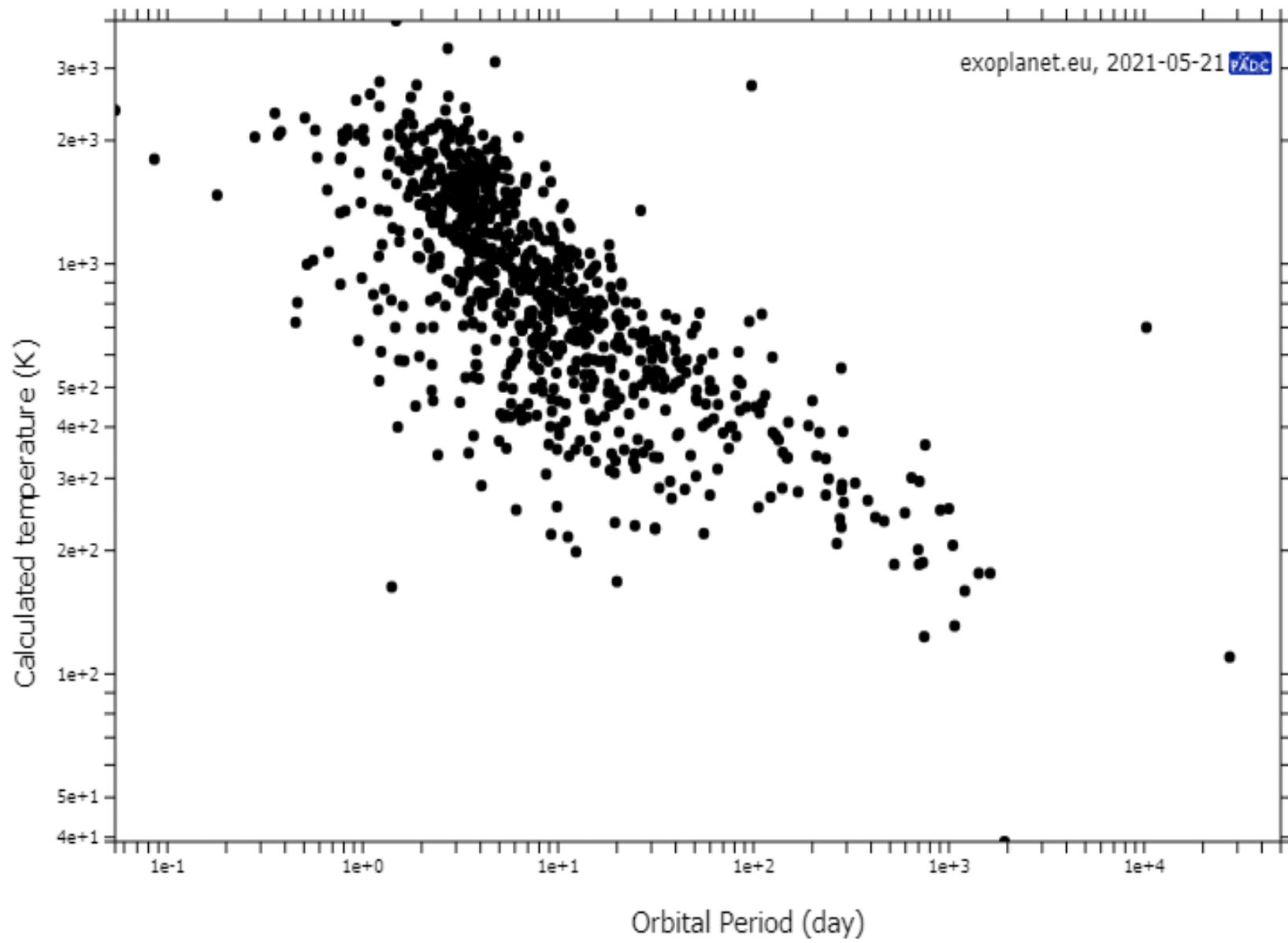
WFIRST ou Roman Space Telescope (NASA, lancement prévu en 2025) Wide Field InfraRed Survey Telescope : recherche par microlensing et imagerie directe d'exoplanètes champ IR 100 x HST

La faune des exoplanètes

- très grosses planètes ($n \times M_{\text{Jup.}}$) très près de leur étoile :
« Jupiter chauds »
 - très grosses planètes plus ou moins loin de leur étoile :
« Jupiter froids » ou « tièdes »
 - planètes moyennes type Uranus ou Neptune très souvent glacées
 - planètes plus petites $n \times M_{\text{Terre}}$: « super-Terres » (n 2-5) ou « Terres » ($n \sim 1$) rocheuses
- statistiques sur les populations d'exoplanètes
voir le site www.exoplanet.eu







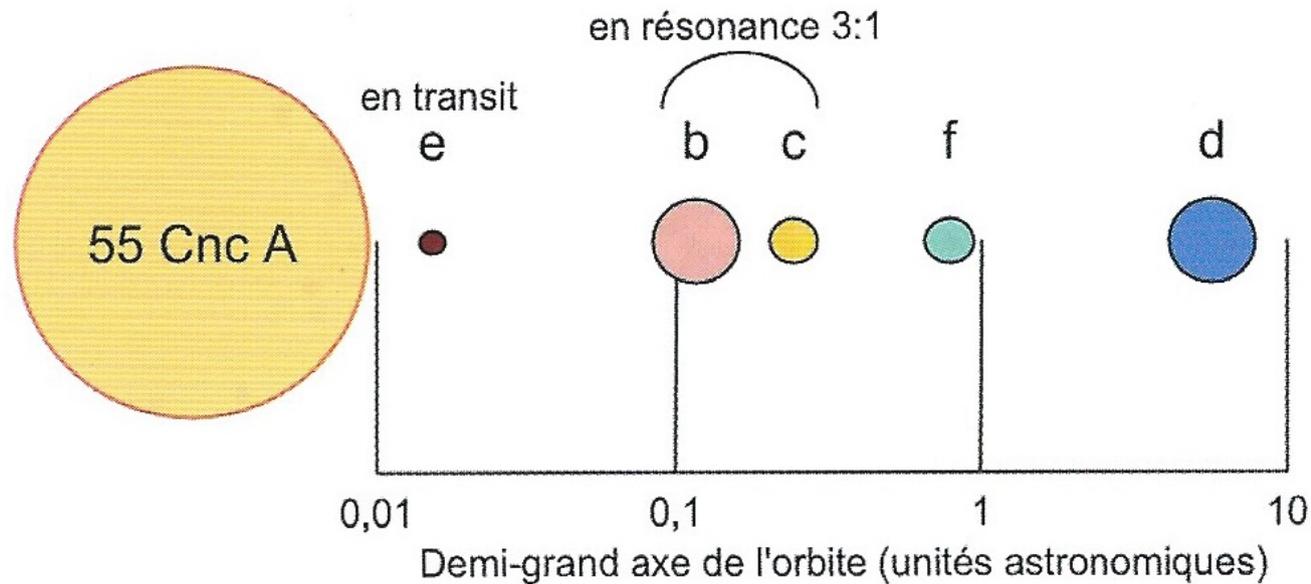
La découverte des exoplanètes a apporté des informations très utiles pour comprendre la formation et l'évolution des systèmes planétaires :

- La diversité des systèmes
- la migration des grosses planètes pendant la phase de formation du système
- ...

C'est un vaste sujet...

ce sera pour un prochain exposé !

Systeme de 5 planètes autour de l'étoile 55 CNC A



b et d : planètes géantes

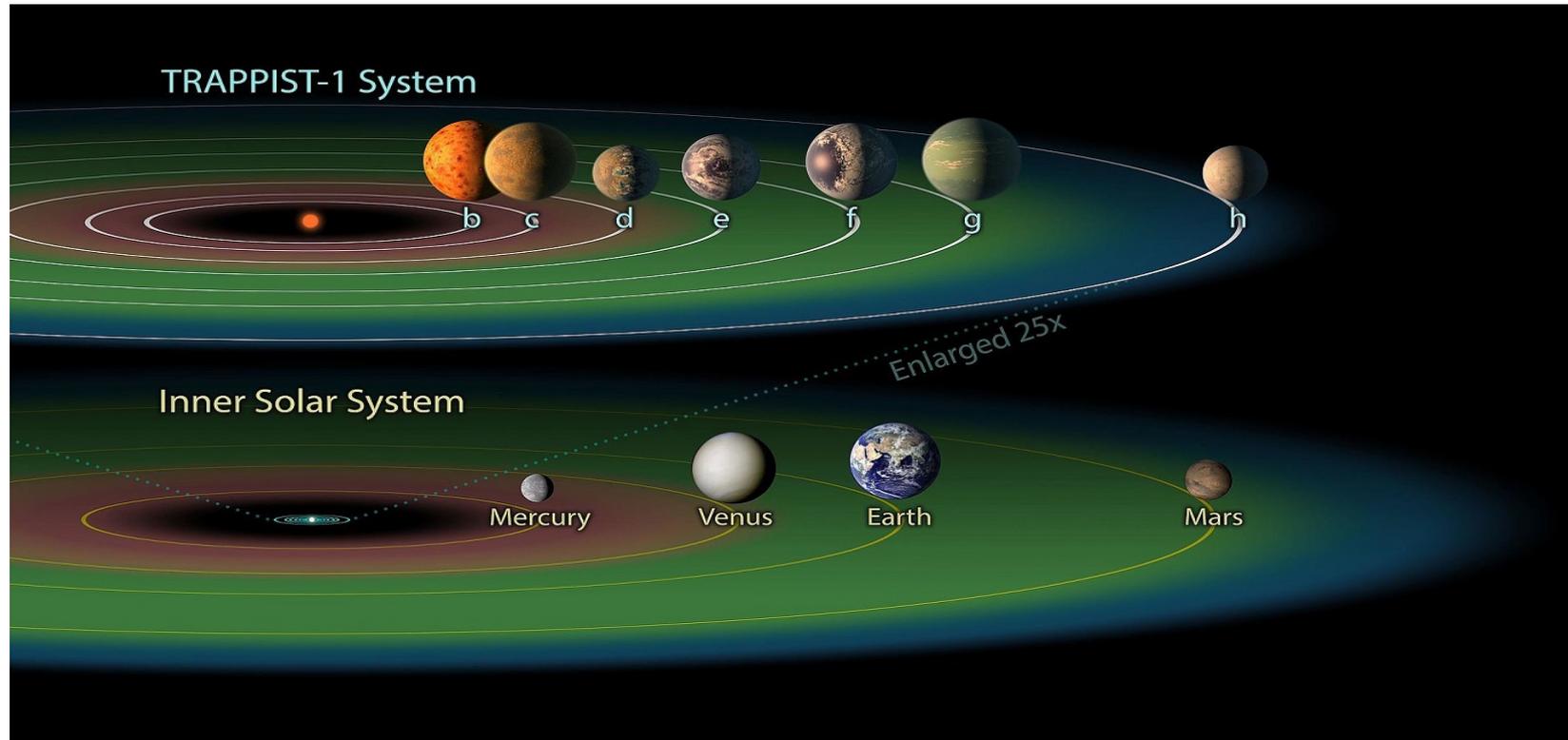
c et f : planètes sous-géantes (~ Uranus)

e : super-Terre

les orbites des planètes sont dans des plans différents

étoile de type K < taille Soleil distance à la Terre : 12 pc

Le système planétaire Trappist-1



7 planètes ~ Terre autour d'une naine rouge distance / Terre ~40 a.l.
étoile : petite $0,08 M_{\odot}$ « froide » 2550K vieille ~ 7,6 G an
système planétaire très compact < orbite de Mercure
Trappist 1h à 0,06 u.a. = 9,3 M km / étoile période orbitale 18,76 j
fort intérêt car les planètes e, f et g sont dans la zone d'habitabilité

Ingrédients pour le développement du vivant

- apport d'énergie :
 - rayonnement de l'étoile ; chaleur interne de la planète
- l'eau :
 - le meilleur solvant naturel ; propriétés physico-chimiques favorables pour la formation de molécules complexes
 - abondante dans l'Univers
- la chimie du carbone :
 - la plus riche pour former des molécules complexes : chaînes hydro-carbonées, acides aminés, etc
- l'oxygène :
 - produite par les végétaux (algues mono-cellulaires ...)
 - permet les mécanismes d'oxydo-réduction

Habitabilité des planètes

voir présentation de O. Mousis Café des Sciences 02/2021

Critères d'habitabilité en surface :

- planète rocheuse
- présence d'eau liquide
 - température de surface entre 273K et ~ 373K
(la limite supérieure dépend de la pression)
 - à la bonne distance de l'étoile (dépend du type d'étoile)
- atmosphère protectrice et « respirable »
 - pression suffisante pour éviter l'évaporation de l'eau
 - présence d'oxygène (validée par la détection d'ozone O₃)
- un atout : champ magnétique pour limiter le lessivage de l'atmosphère par le vent stellaire et protéger la surface des particules ionisantes qu'il véhicule

Critères d'habitabilité sous la surface moins contraignants (cf. Europe et Encelade) :

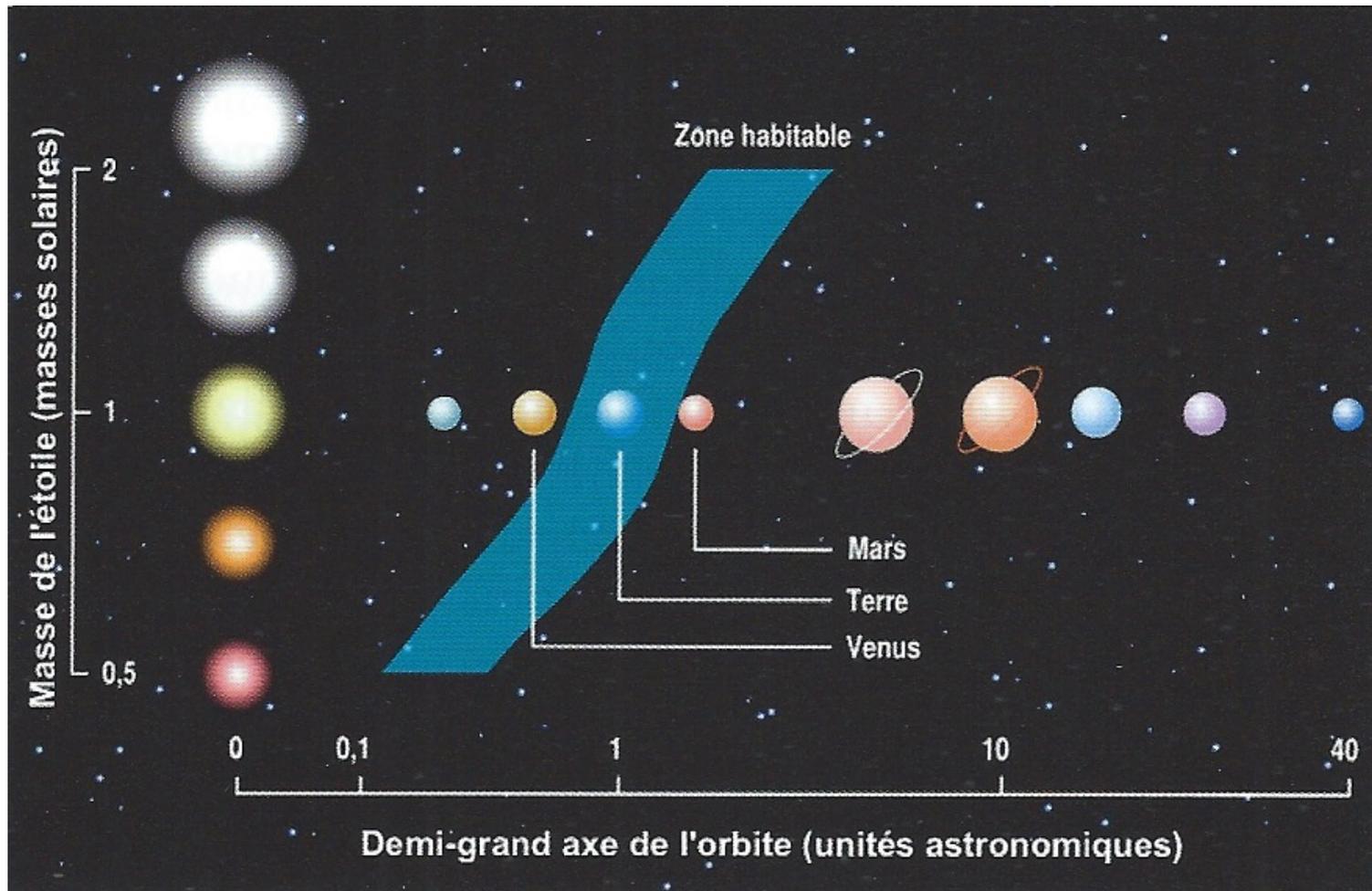
- océan d'eau liquide sous une croûte de glace
- production de chaleur interne suffisante
- ...

Caractéristiques favorables du système planétaire

- étoile plutôt petite, ni trop chaude ni trop froide
~ Soleil, naine jaune ou rouge ...
 - durée de vie suffisante (plusieurs G an) pour permettre l'apparition de la vie et son évolution
 - éviter étoile froide : bouffées UV néfastes
- excentricité des orbites faible
 - flux de l'étoile sur la planète ~ constant
- système dynamiquement stable
 - grosse(s) planète(s) stabilisatrices formées précocément
 - sinon comportement \pm chaotique : orbites changeantes, collisions, etc

Systeme solaire : on a de la chance...

voir A. Morbidelli, *L'Astronomie* 130, pp. 24-29 (09/2019)



zone habitable en surface suivant la masse de l'étoile
le système solaire est montré comme référence

Conclusion pour résumer

- L'existence d'autres mondes habités: question permanente de l'humanité
- Les premières découvertes d'exoplanètes sont récentes (~25 ans)
- Les technologies actuelles au sol et dans l'espace permettent une caractérisation élémentaire des exoplanètes et de « voir » les plus grosses
- Nouveaux instruments → les prochaines décennies apporteront des découvertes sensationnelles, peut-être la présence de la vie en-dehors du système solaire
- Progrès de la connaissance des systèmes planétaires et de leur étonnante diversité

Compléments

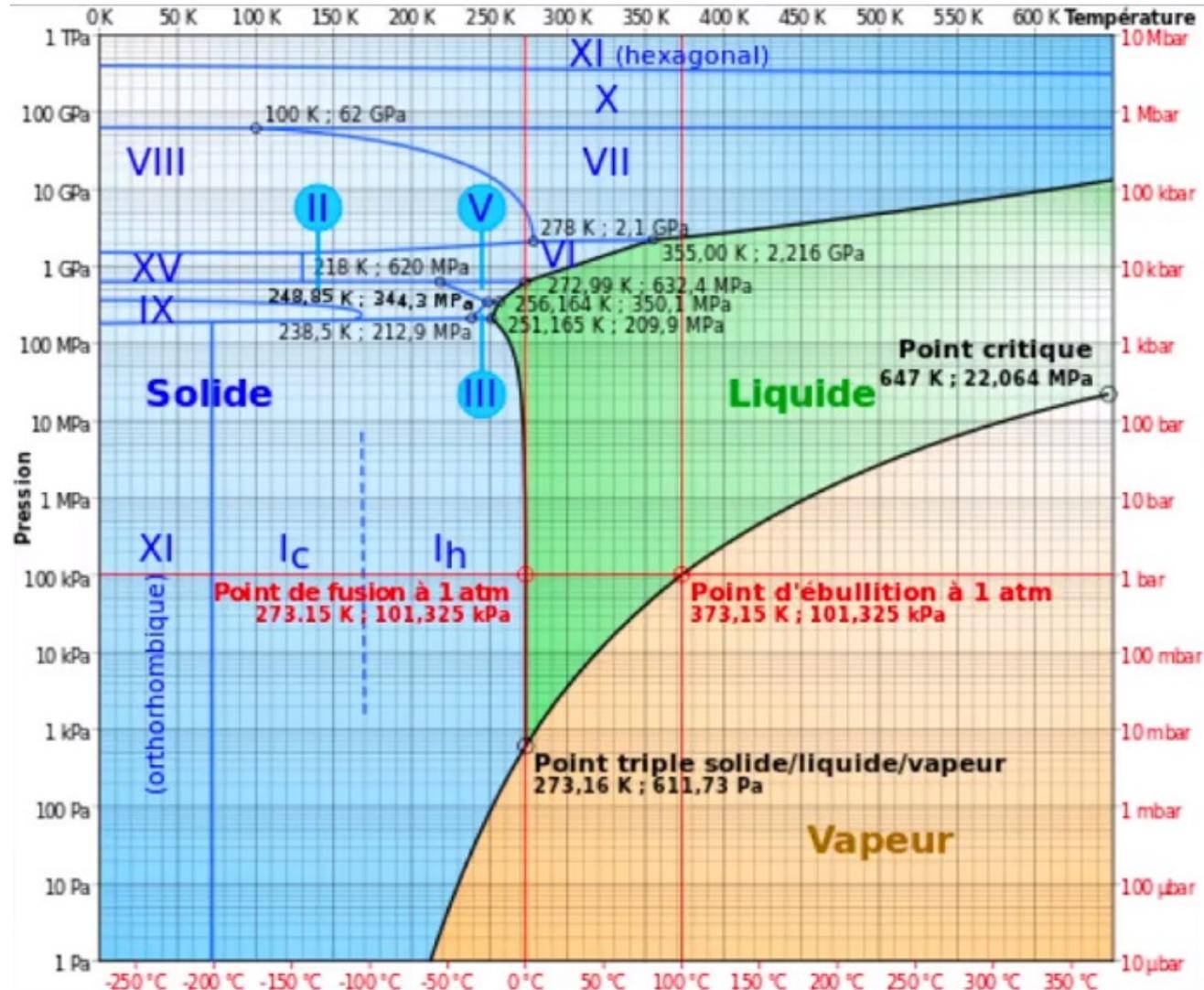
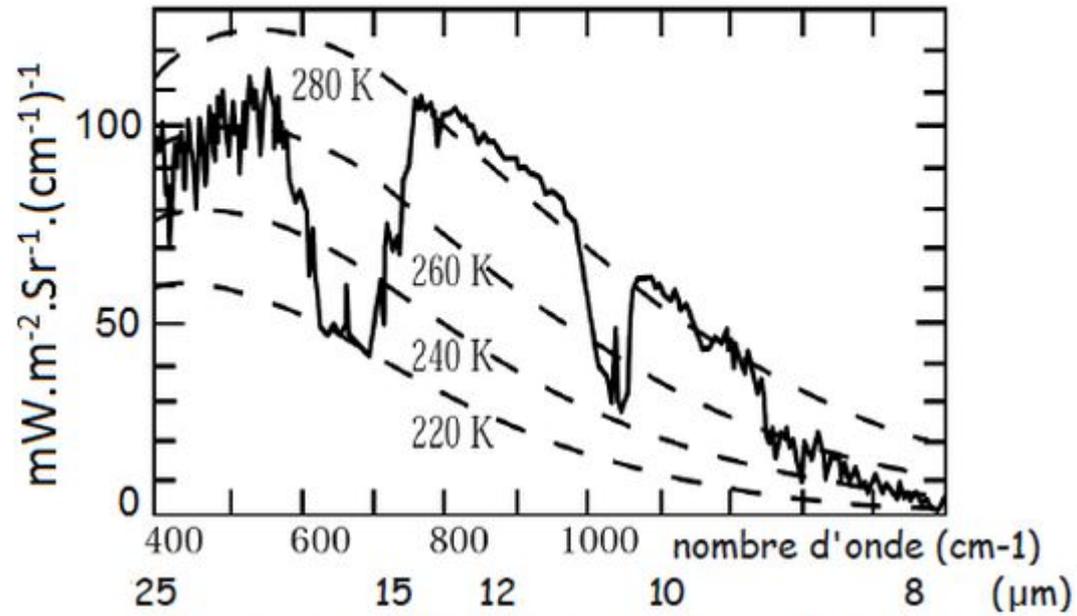
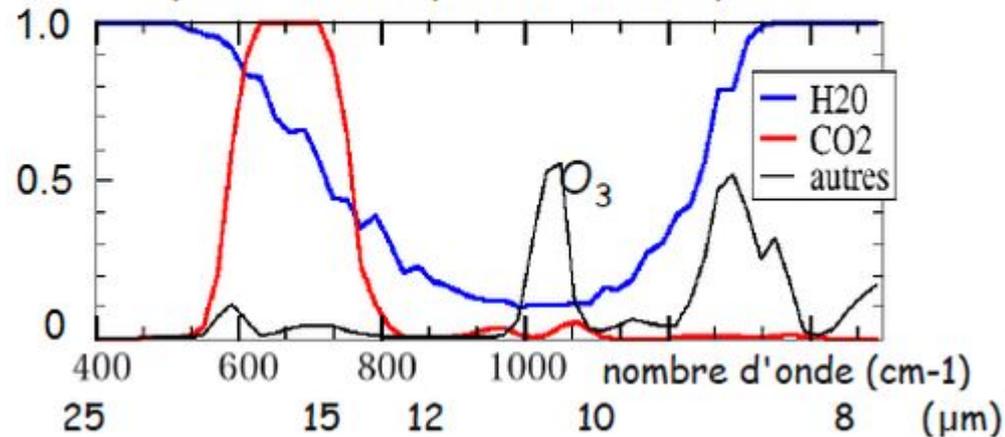


diagramme des phases de l'eau

Spectre infra-rouge observé par satellite



Spectre d'absorption de l'atmosphère



spectres d'émission et d'absorption
de l'atmosphère terrestre