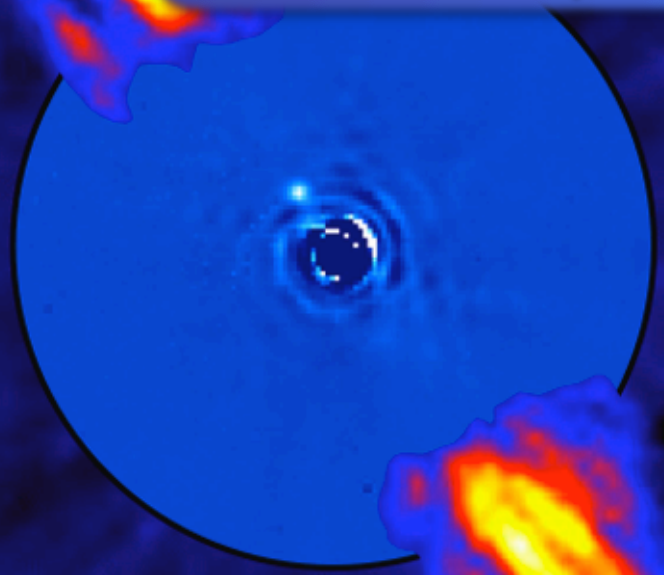
l'Observatoire de Paris — LESIA

Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

Exoplanètes :

connaissances actuelles & techniques de détection

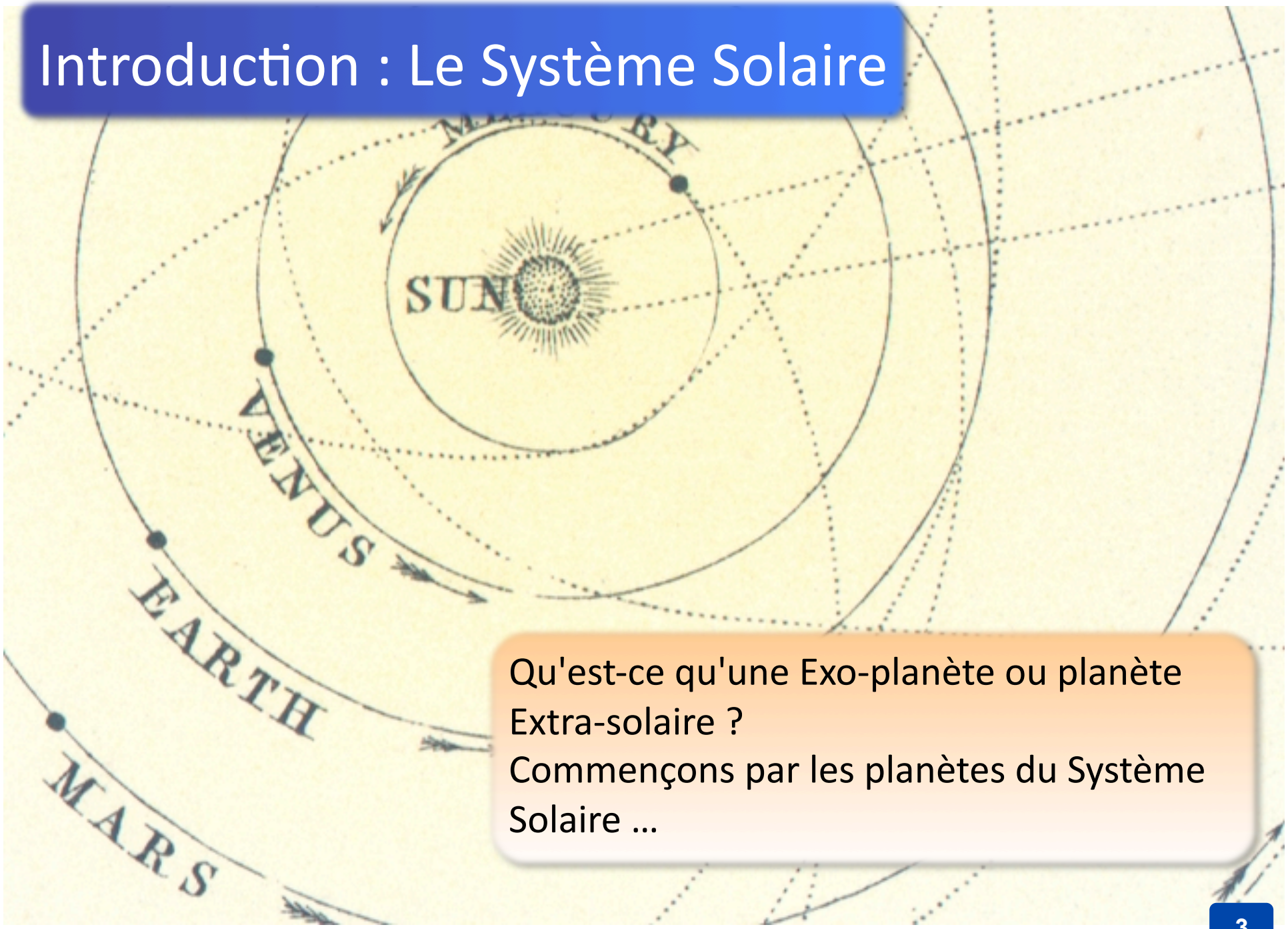


Anthony Boccaletti
LESIA, Observatoire de Paris

Plan

- Introduction (Syst. Solaire)
- Origine, Formation, Evolution
- Techniques de détection indirectes
- Techniques de détection directes

Introduction : Le Système Solaire



Qu'est-ce qu'une Exo-planète ou planète Extra-solaire ?
Commençons par les planètes du Système Solaire …

Qu'es ce qu'une exoplanète ?

l'Observatoire de Paris — LESIA
Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

Définition IAU 2006

corps céleste :

- en orbite autour du Soleil
- de masse suffisante pour que sa gravité permette un équilibre hydrostatique => presque sphérique
- qui a fait place nette autour d'elle
- qui n'est pas un satellite d'une autre planète

=> tous les autres objets sont des petits corps/planètes naines

Quelques définitions …

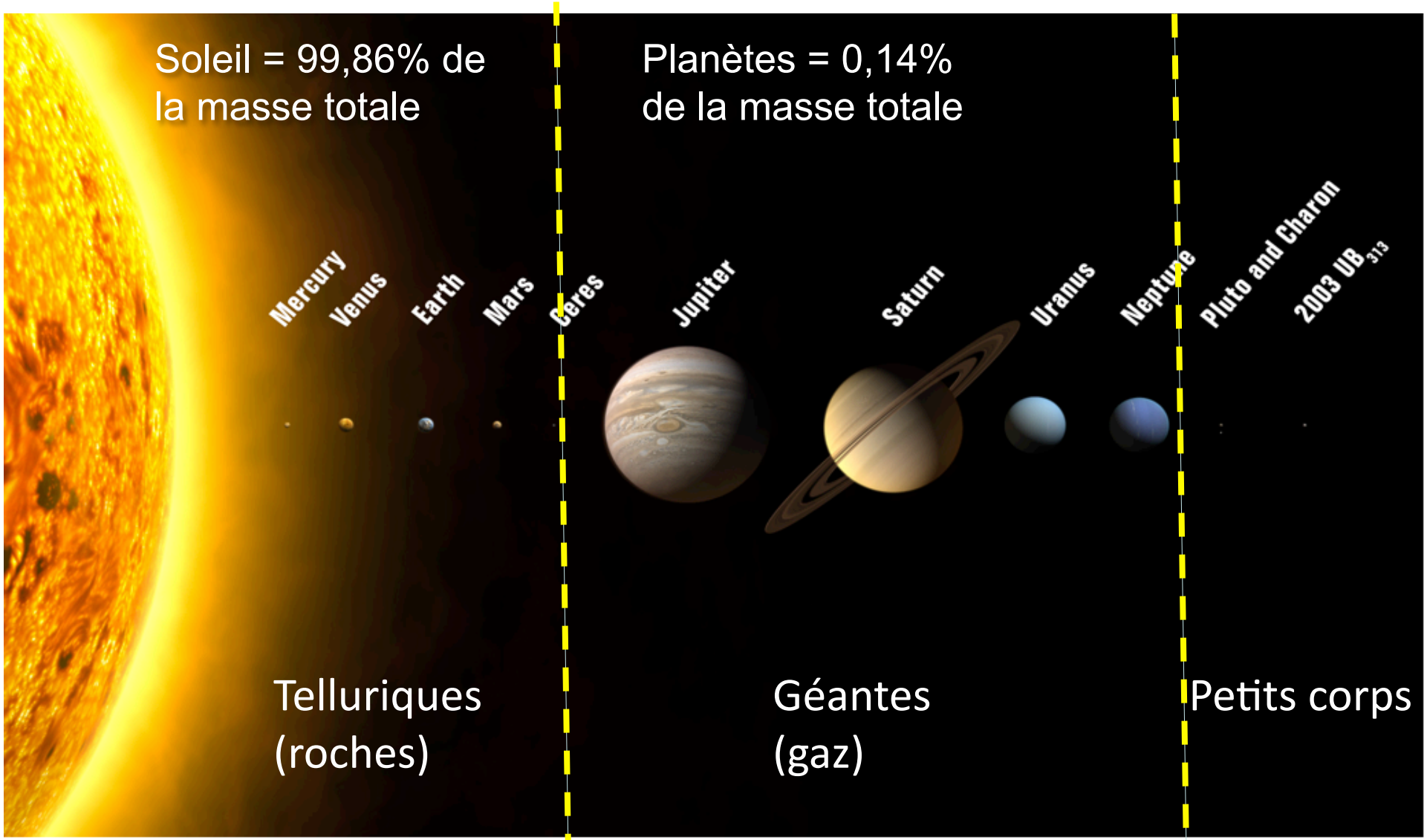
- Unité Astronomique :

  distance Terre – Soleil = 150×10^6 km
- Parsec : distance à laquelle un segment de 1 UA est vu sous un angle de 1arc-seconde

  ρ ["] = r [UA] / d [pc]
- Masse de Jupiter :

  $0.001\ M_{solaire} = 318\ M_{Terrestre}$

Le système Solaire

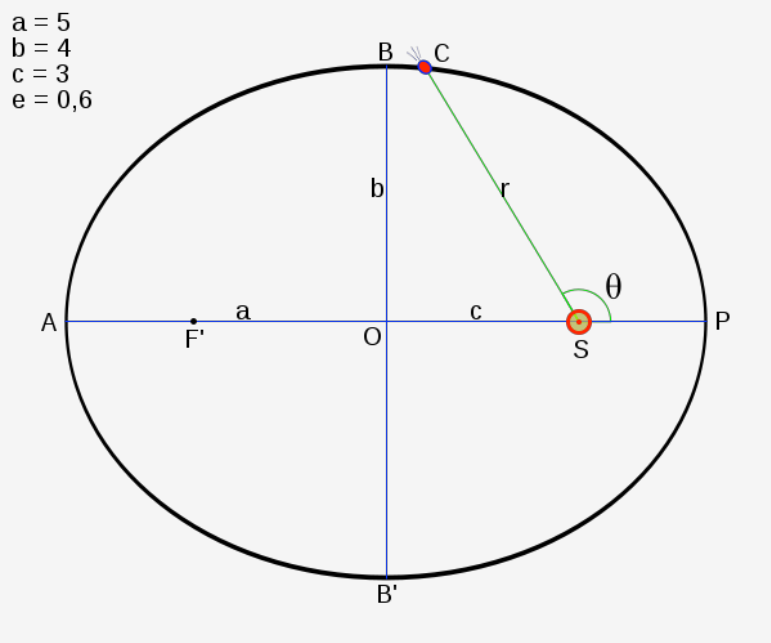


Caractéristiques des planètes

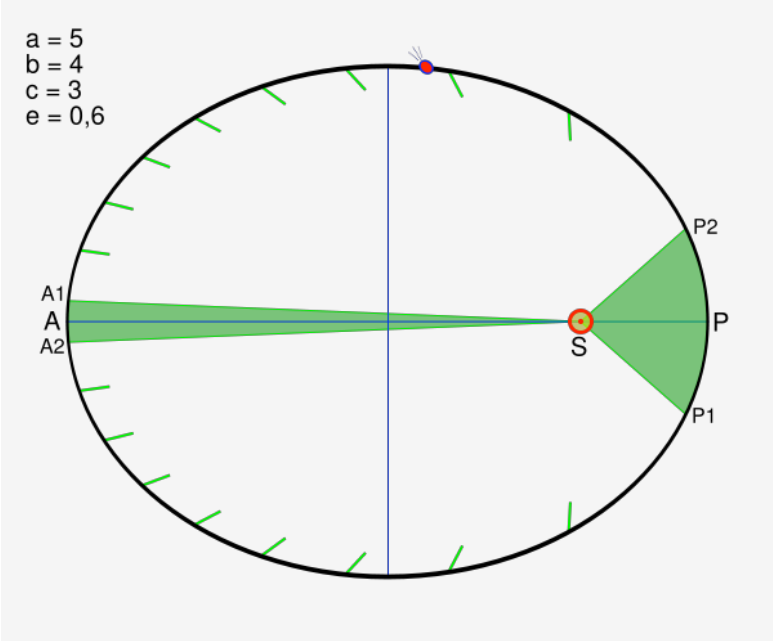
• Mercure	0,39 UA	0,24 an	0,38 R_T	0,06 M_T	5,43 $g \cdot cm^{-3}$
• Vénus	0,72 UA	0,62 an	0,95 R_T	0,82 M_T	5,24 $g \cdot cm^{-3}$
• Terre	1,00 UA	1,00 an	1,00 R_T	1,00 M_T	5,52 $g \cdot cm^{-3}$
• Mars	1,52 UA	1,88 an	0,53 R_T	0,11 M_T	3,94 $g \cdot cm^{-3}$
• Jupiter	5,20 UA	11,9 ans	11,2 R_T	318 M_T	1,33 $g \cdot cm^{-3}$
• Saturne	9,54 UA	29,4 ans	9,45 R_T	95,2 M_T	0,70 $g \cdot cm^{-3}$
• Uranus	19,2 UA	83,7 ans	4,01 R_T	14,4 M_T	1,30 $g \cdot cm^{-3}$
• Neptune	30,1 UA	164 ans	3,88 R_T	17,1 M_T	1,76 $g \cdot cm^{-3}$

Lois de Kepler

1ere Loi:
Les planètes décrivent des orbites elliptiques dont le Soleil occupe l'un des foyers



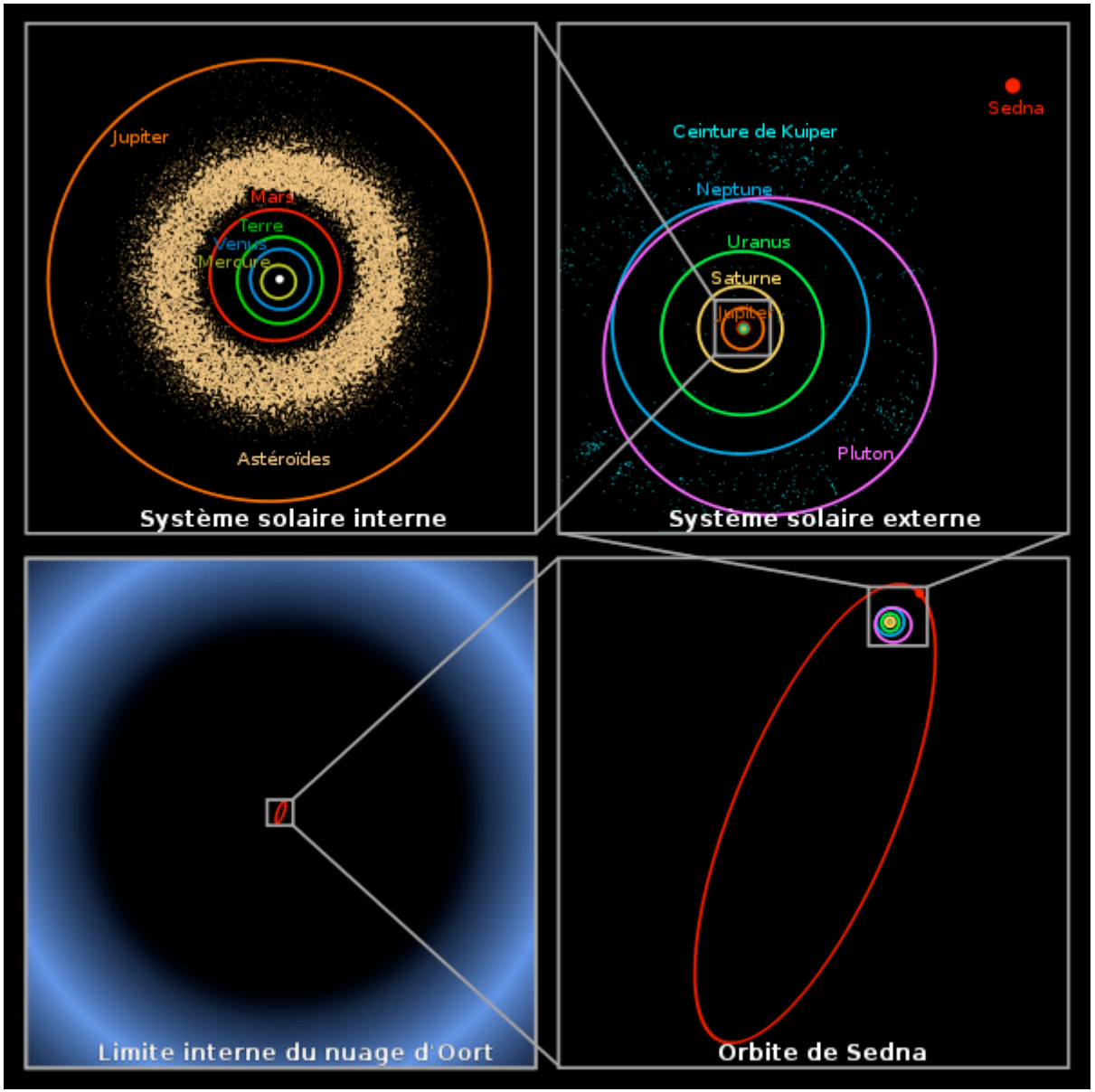
2eme Loi:
Le rayon vecteur planète-Soleil, balaye des aires égales en des temps égaux



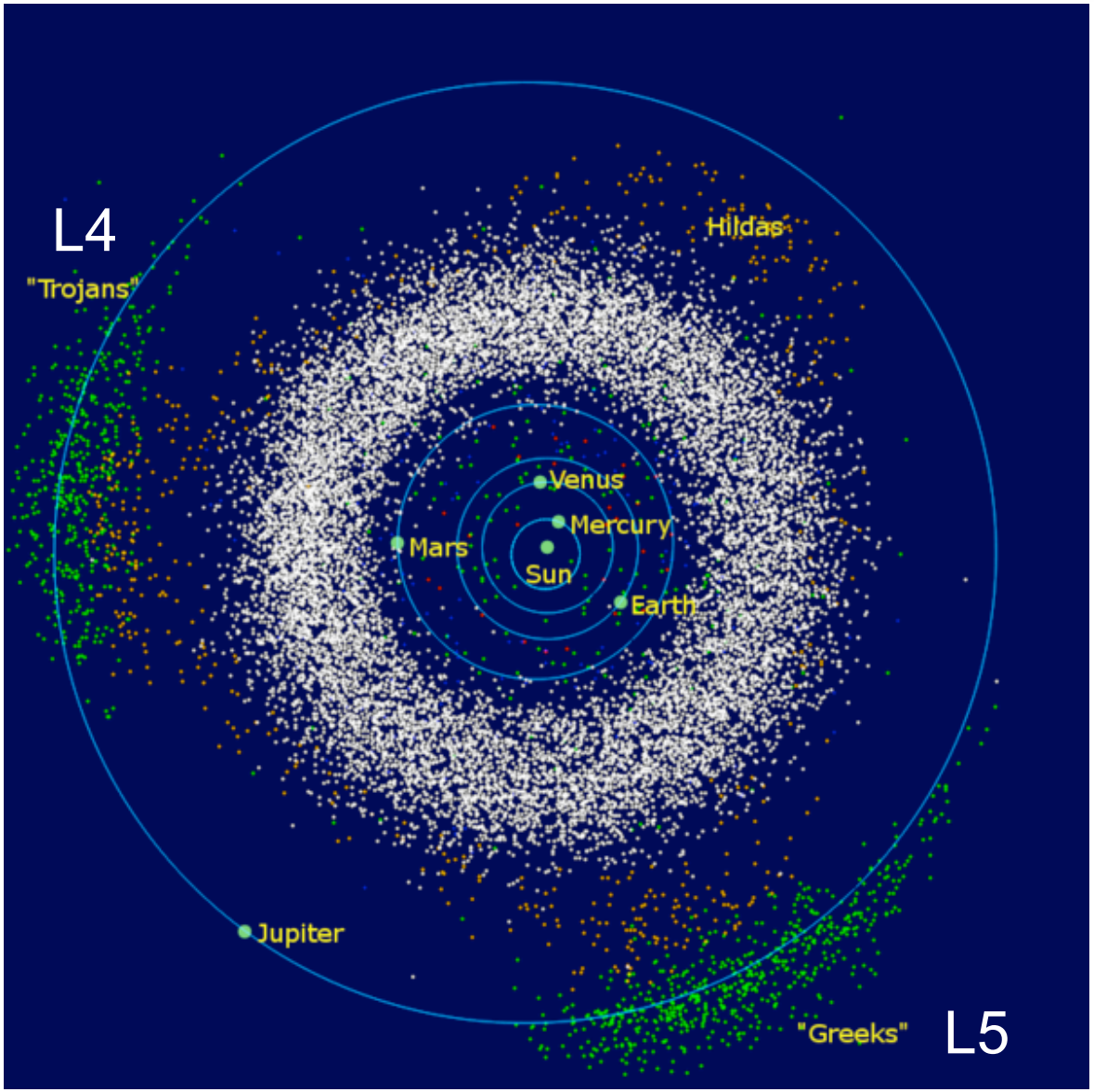
3eme Loi:
Le carré de la période ***T*** est proportionnel au cube du demi grand axe ***a***.

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

Architecture du système Solaire



Ceinture d'Astéroïdes



Collisions très fréquentes
⇒ poussières
⇒ lumière zodiacale

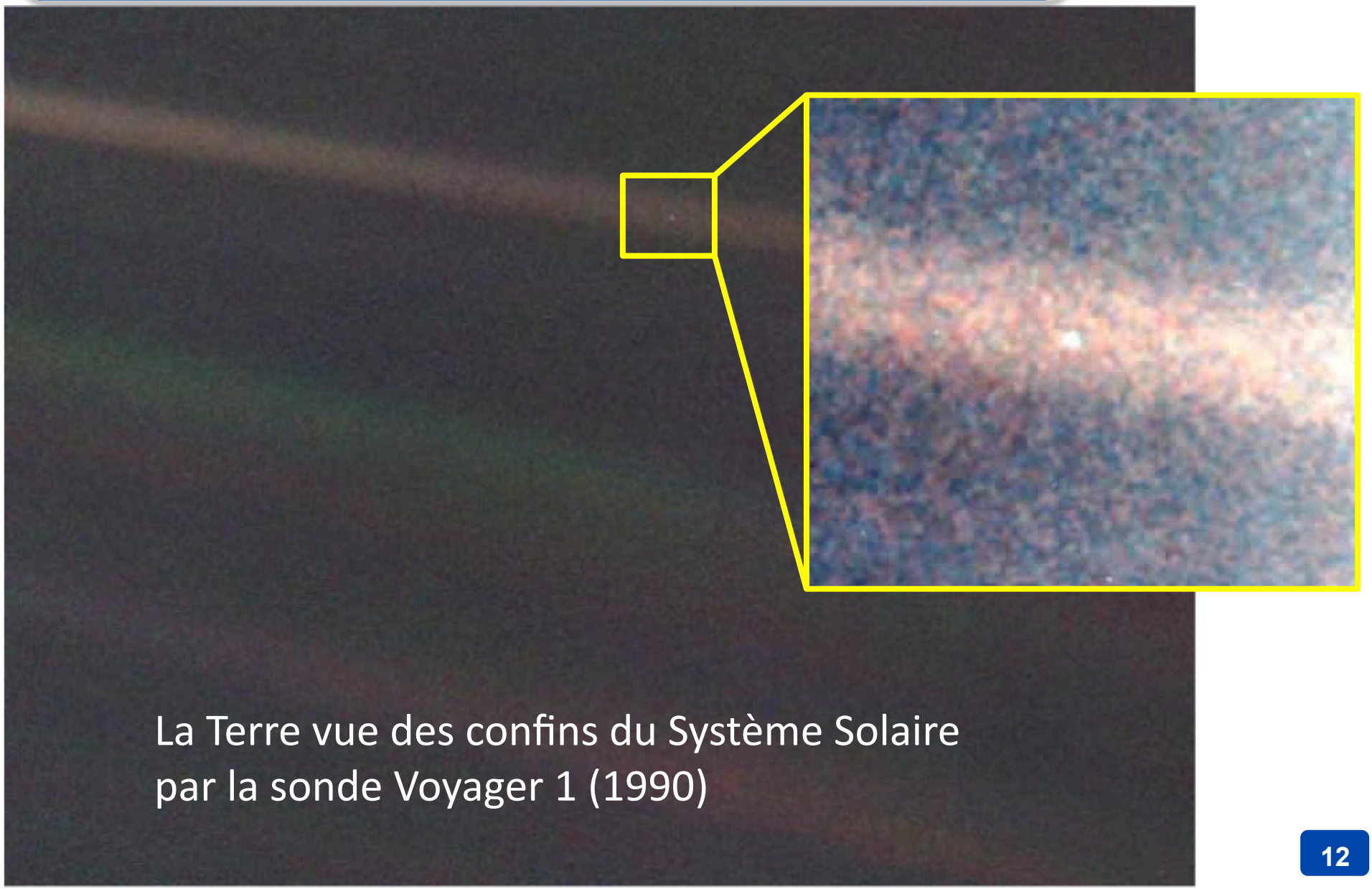
Origines :
⇒ matière qui n'a jamais formée de planètes
⇒ collision d'anciennes planètes

Ceinture de Kuiper

La ceinture de Kuiper contient des objets similaires à Pluton

Origine: planétésimaux qui n'ont pas formés de planètes (< 3000 km)
Collisions => poussières

Vue d'ensemble



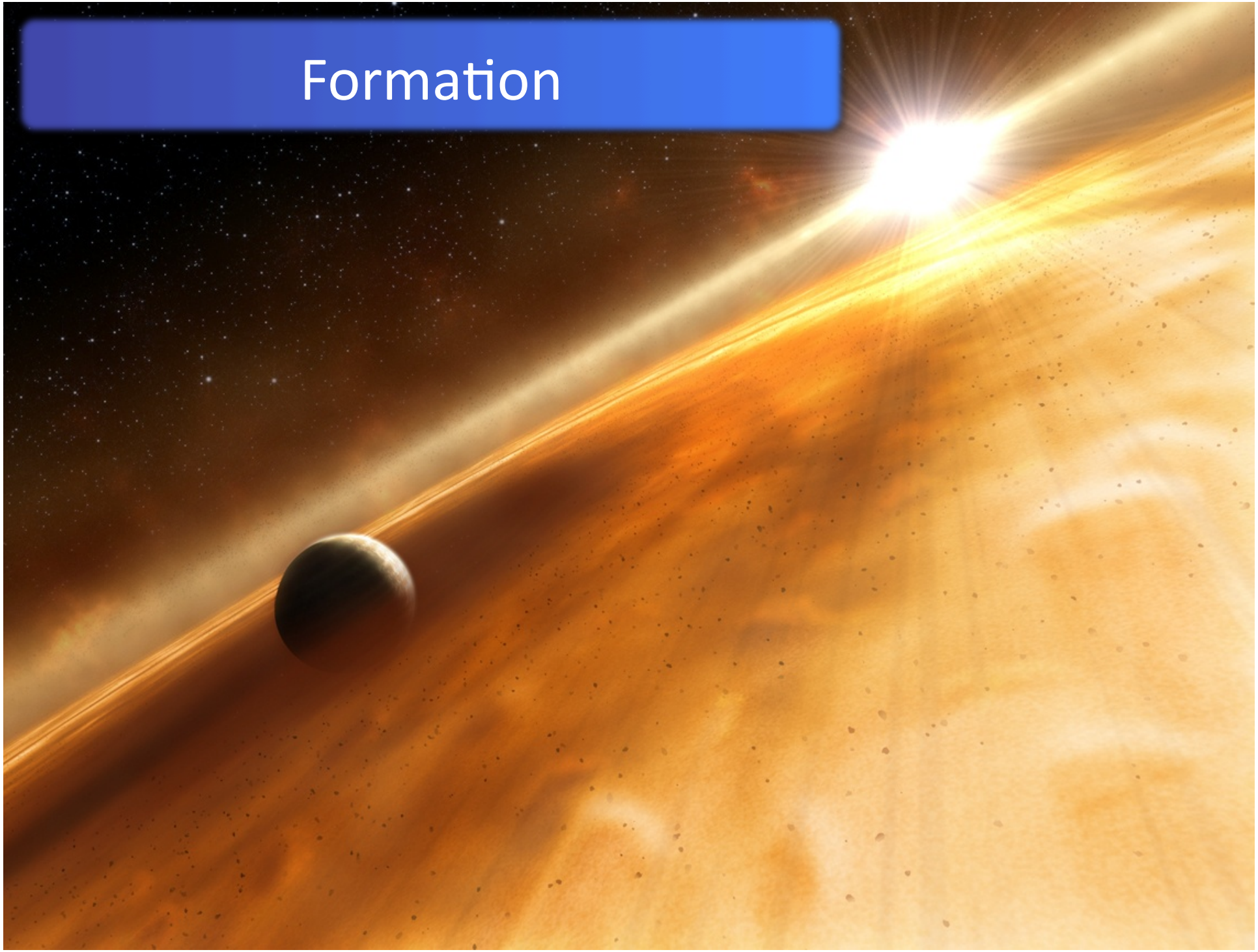
La Terre vue des confins du Système Solaire
par la sonde Voyager 1 (1990)

En résumé …

- Plusieurs composantes : telluriques, gazeuses, poussières, …
- Le système solaire n'est pas unique !
- aucune raison que tous les systèmes soient identiques (architecture des planètes)
- aucune raison que tous les types de planètes soient présents dans le syst. Solaire

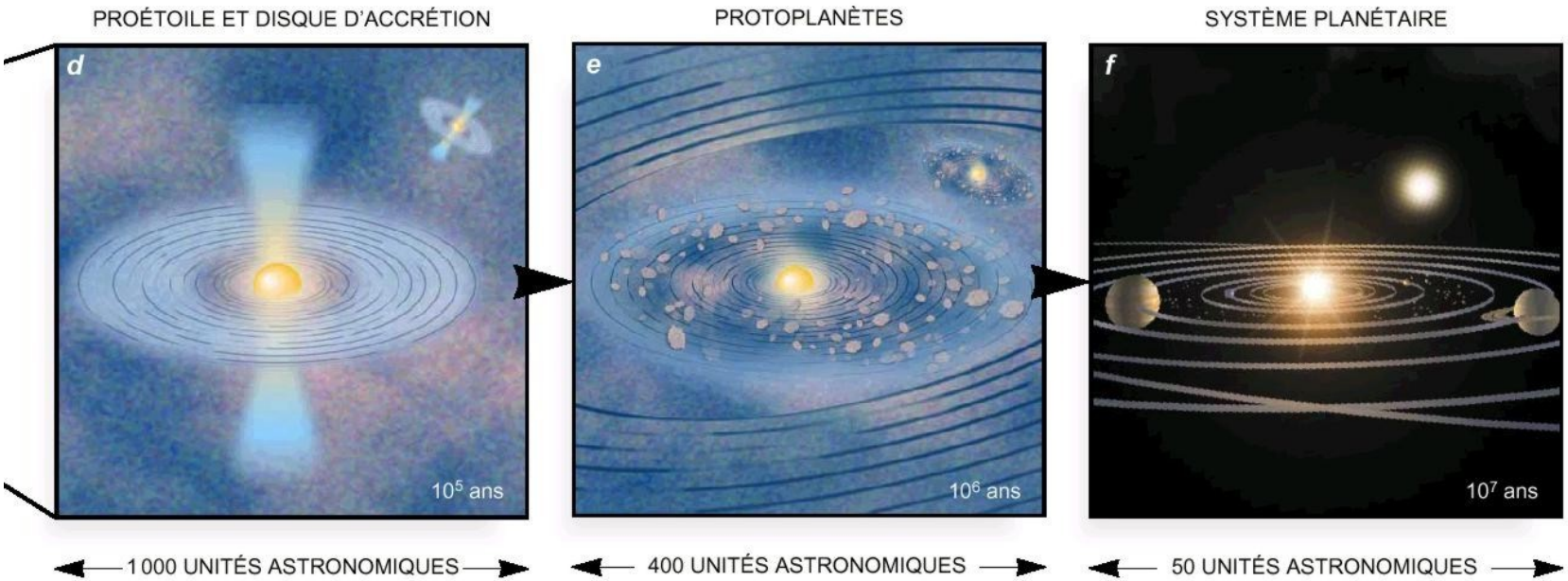
The big question: Existe-t-il un analogue à la Terre ???

Formation

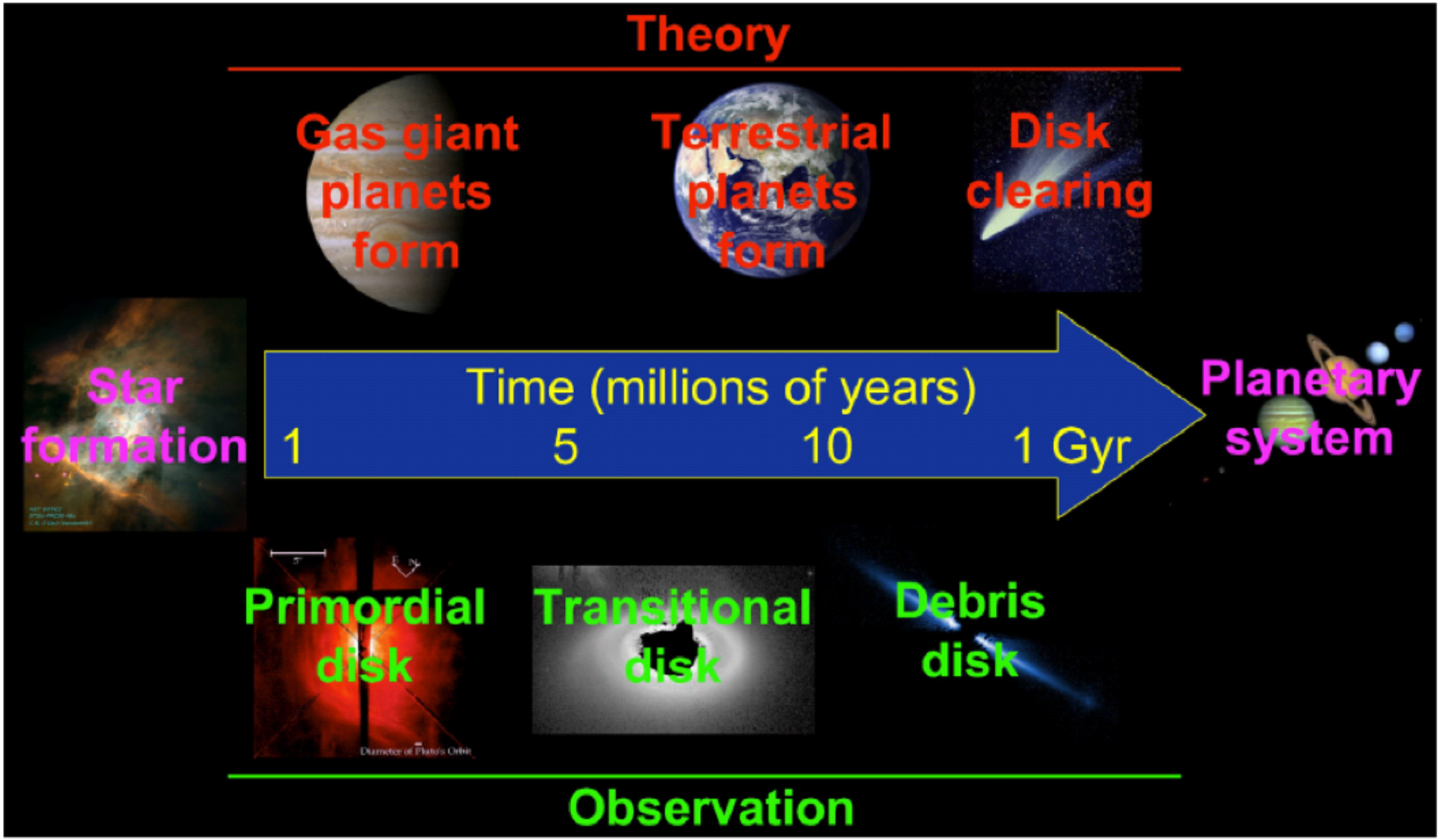


Modèle de formation (simplifié !)

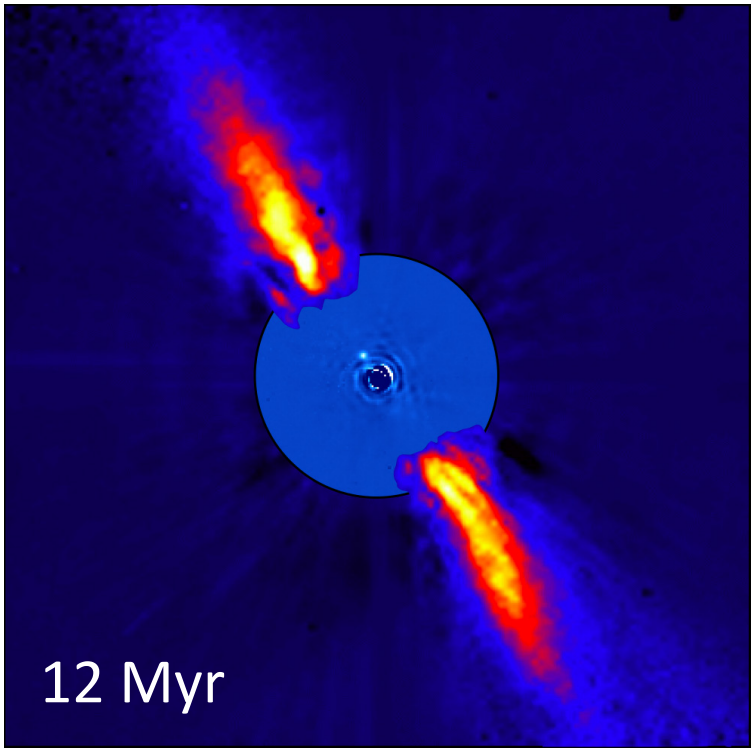
- Les planètes se forment en même temps que les étoiles sur des durées de quelques millions d'années
- Les étoiles se forment dans les nuages moléculaires (hydrogène) par effondrement gravitationnel
- Formation d'un disque d'accrétion contenant des poussières qui deviennent centimétriques en qcq milliers d'années
- Formation des planétésimaux (~ km) + comètes
- Formation des coeurs planétaires: croissance des planétésimaux => planètes telluriques
- Formation des enveloppes gazeuses: nécessite des coeurs telluriques qui capturent du gaz (~ millions d'années) => planètes gazeuses



Modèle de Formation

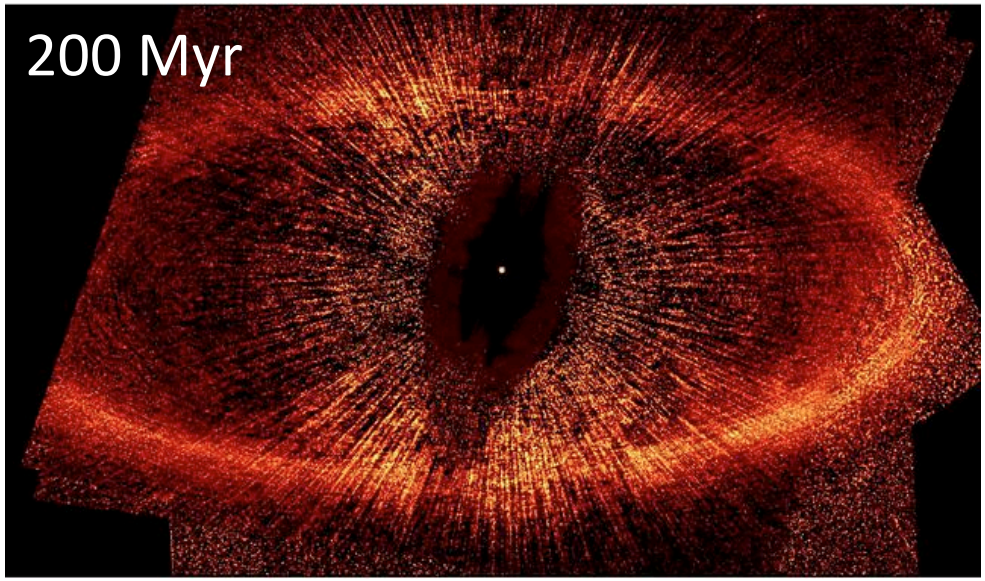


Dans les disques de débris …

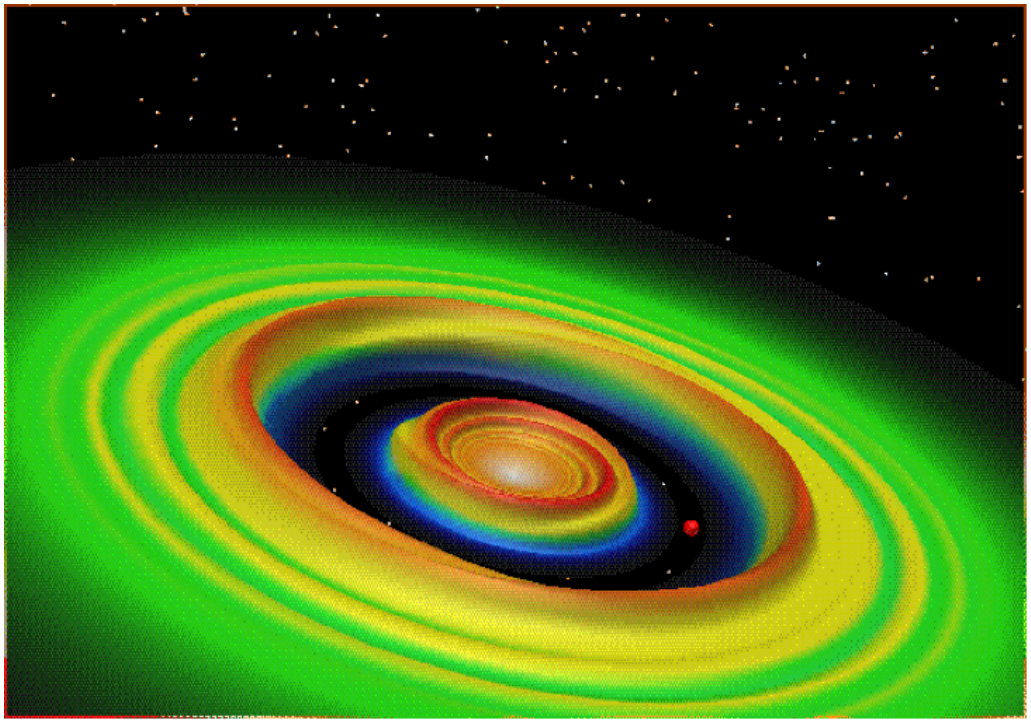


Collisions des planétésimaux créent de la poussière (débris): disques de débris

Les planètes sont déja formées dans un disques de débris mais encore beaucoup de poussières et planétésimaux

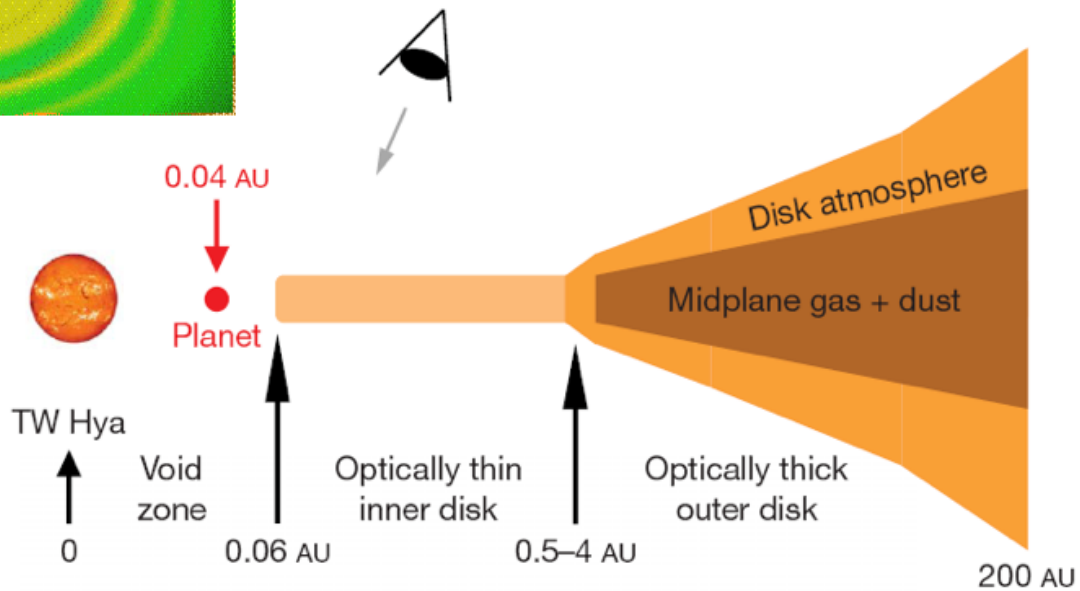


Structures dues aux planètes

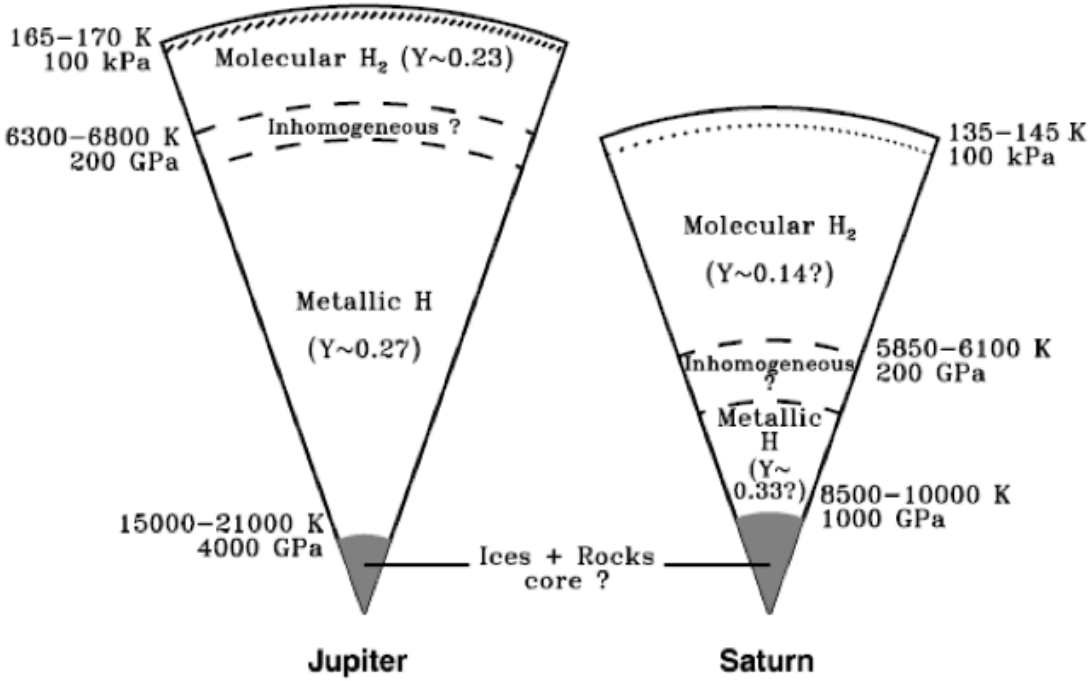


Formation de sillons, offset, warp, anneaux ….
Preuves indirectes de la présence de planètes et donc permet d'étudier la formation planétaire

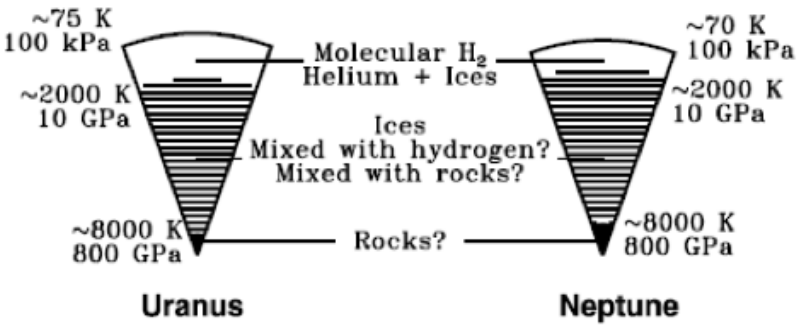
La vision d'un système planétaire en formation dépend beaucoup de l'orientation de l'objet avec l'observateur



Structure interne Géantes

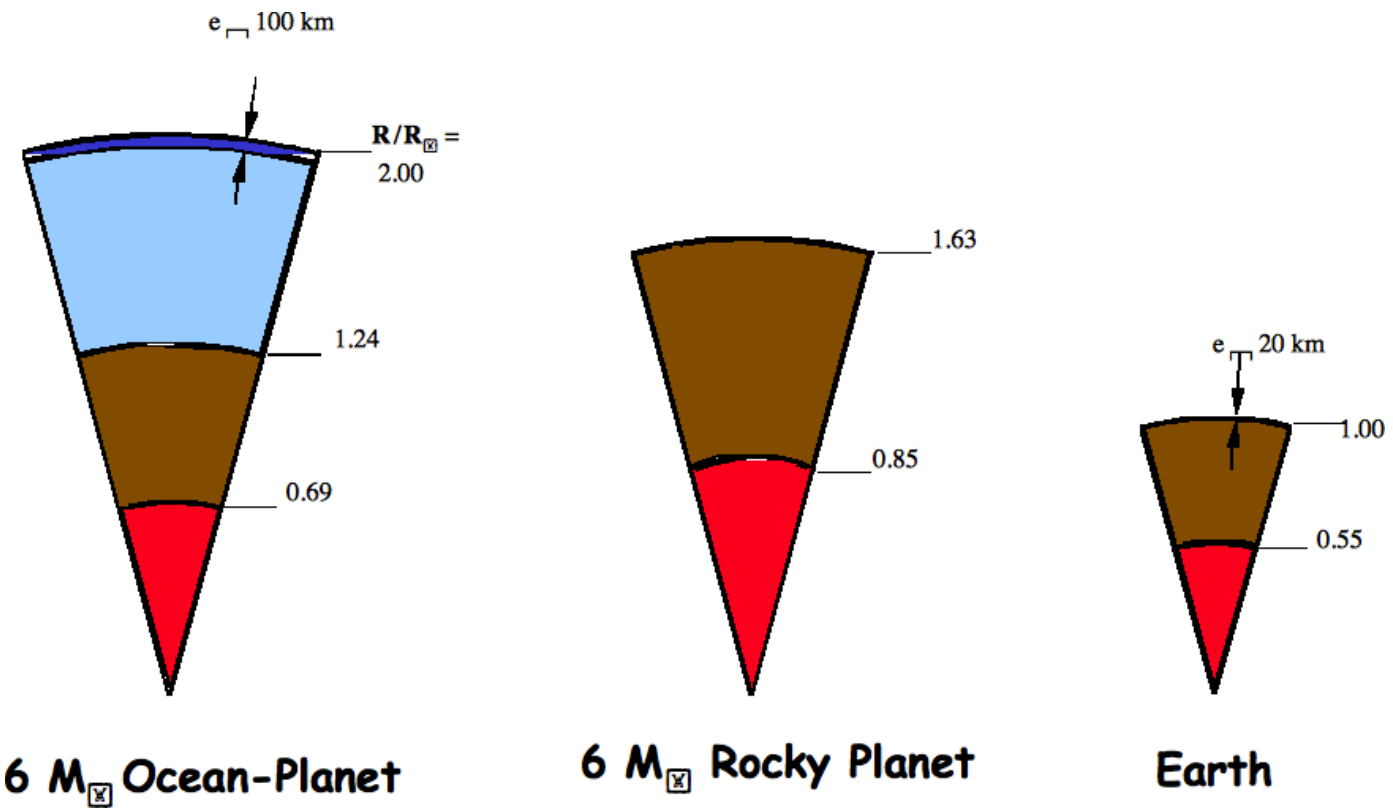


Géantes gazeuses

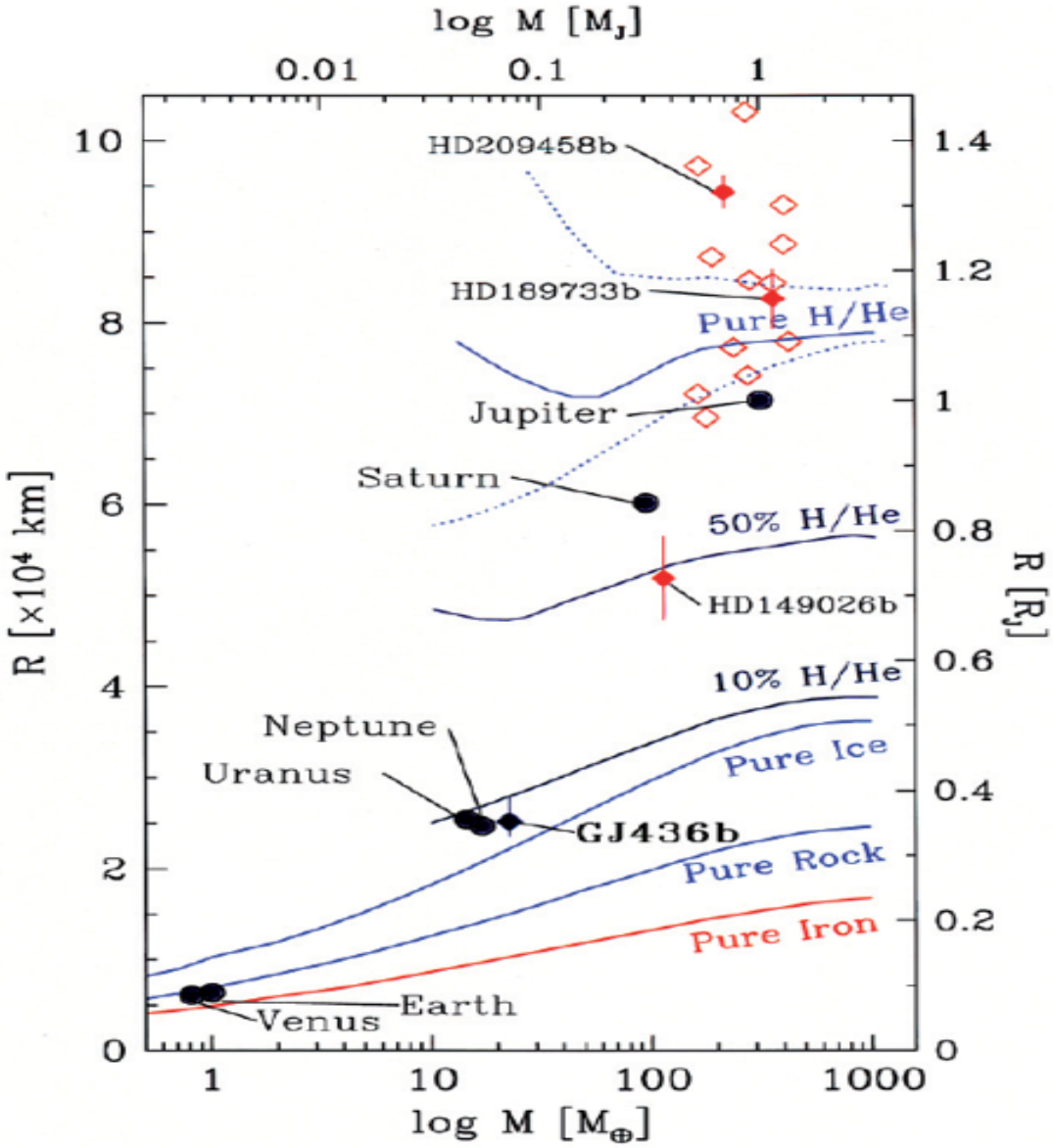


Géantes glacées

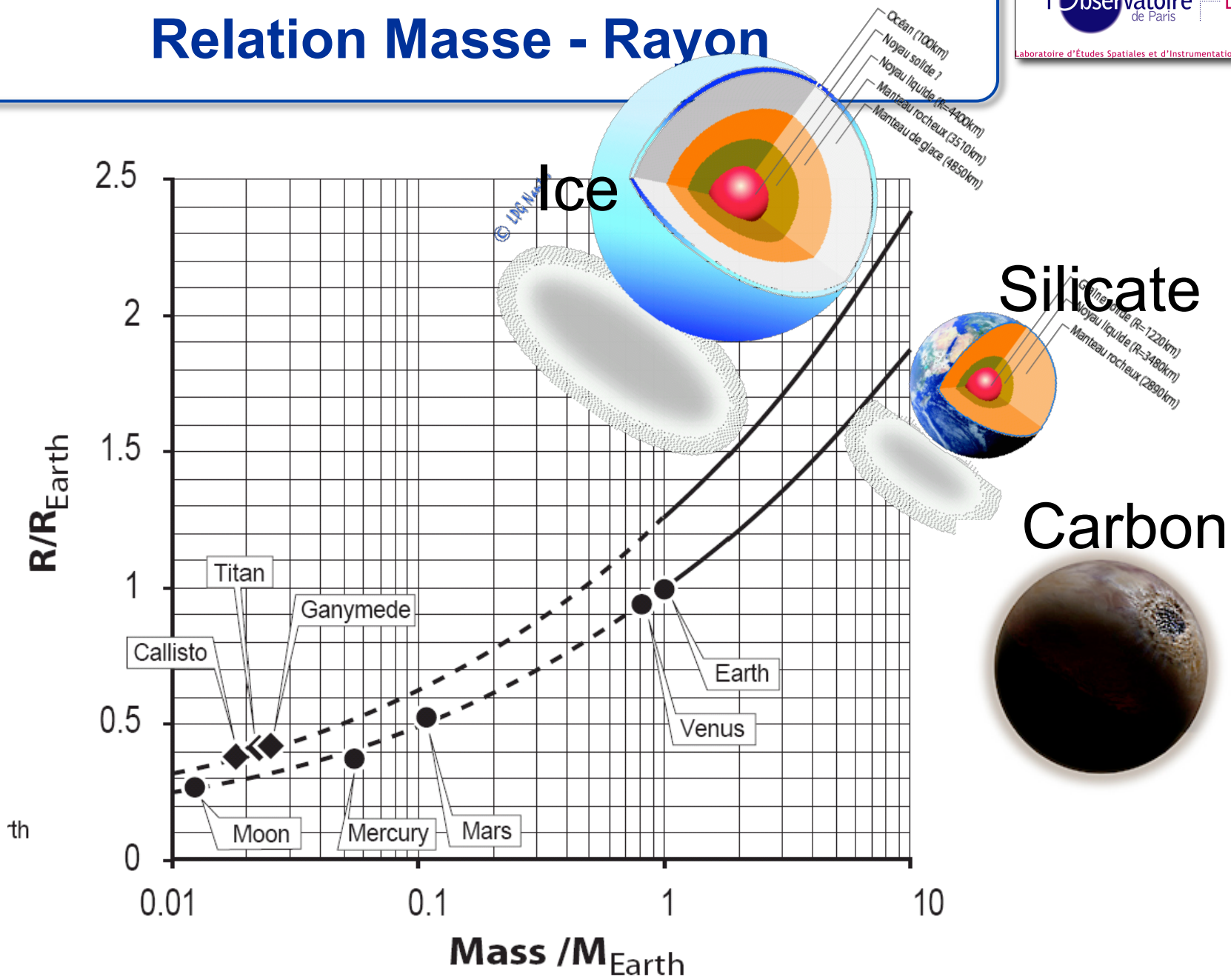
Structure interne telluriques

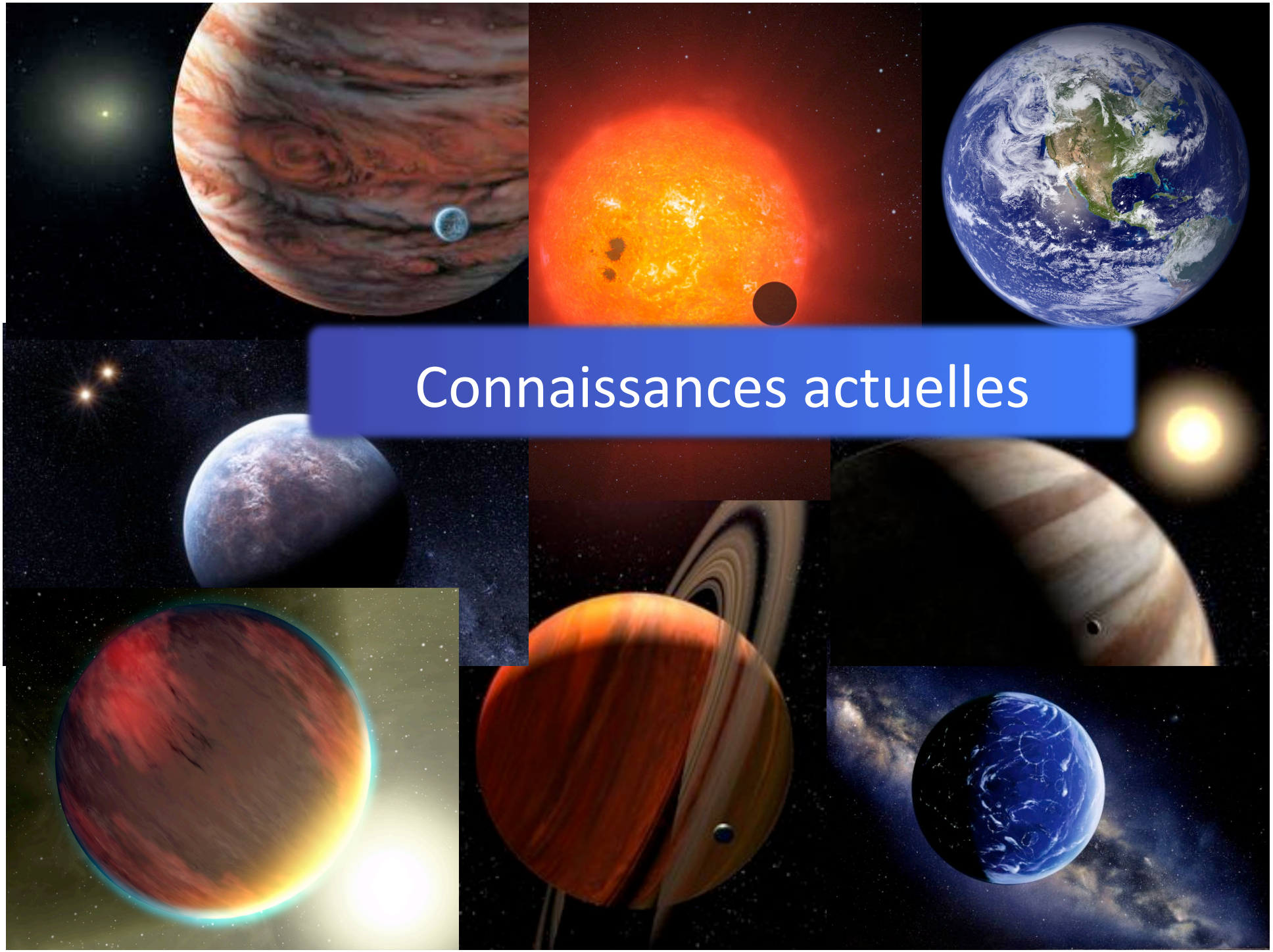


Relation Masse - Rayon



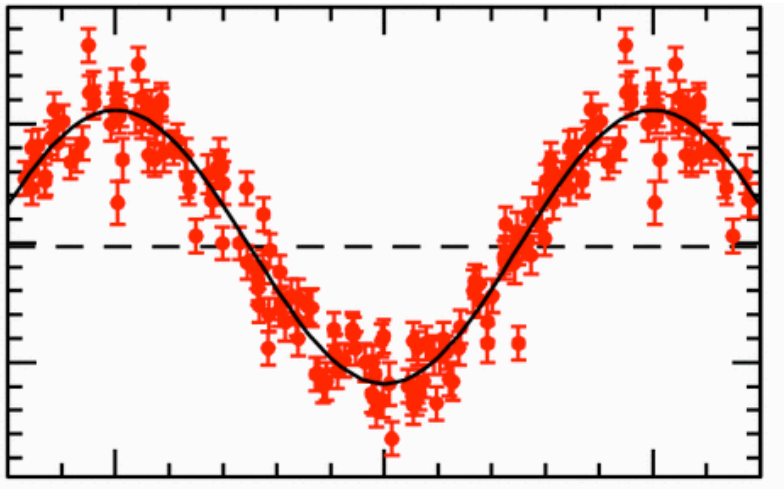
Relation Masse - Rayon





Connaissances actuelles

Comment tout a commencé ?



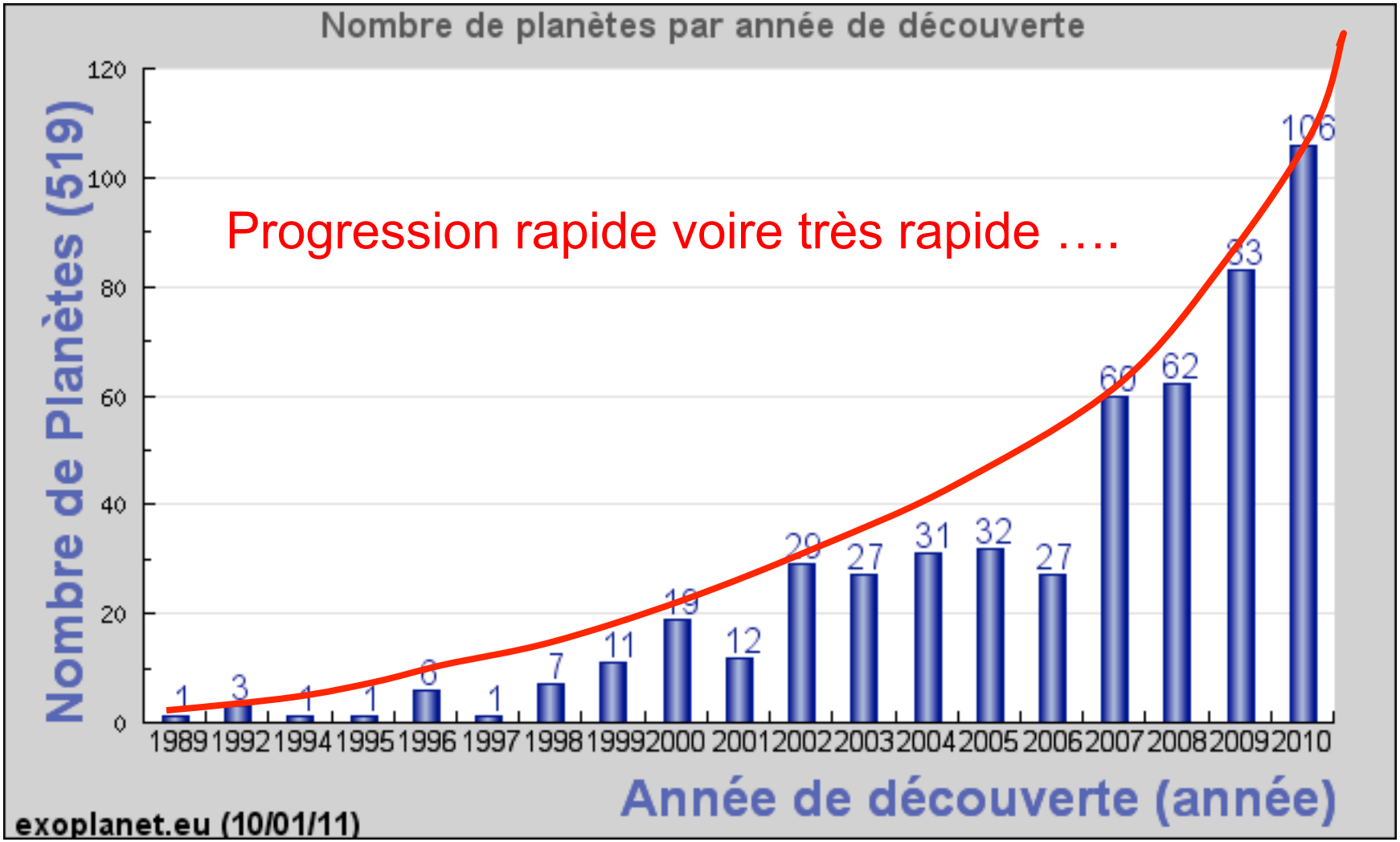
Comme ça … en 1995 …

avec un vieux clou …
en France …

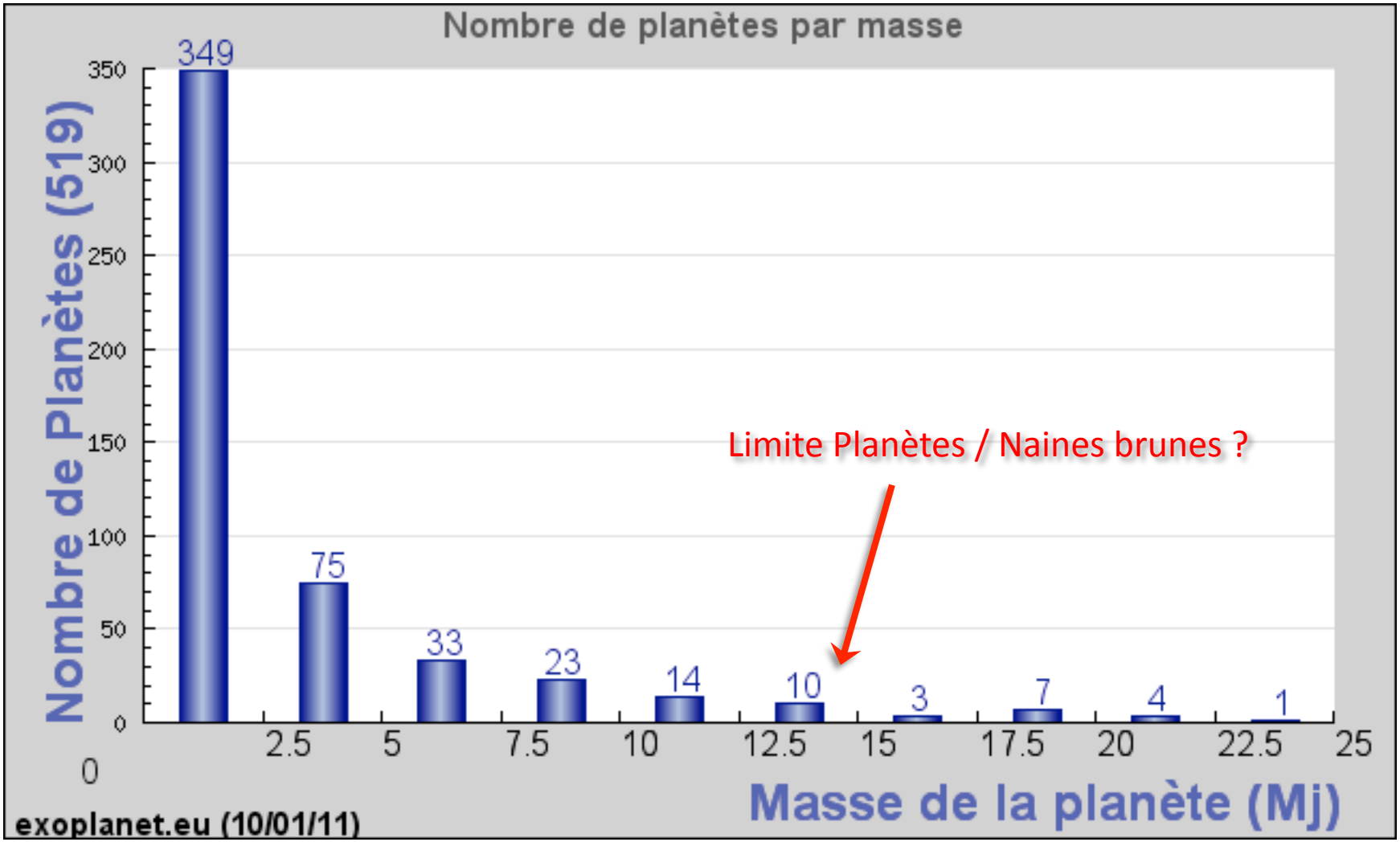
Mayor & Queloz : découverte de 51 Peg b

Découverte de 51 Peg: nouvelle classe de Jupiters chaud

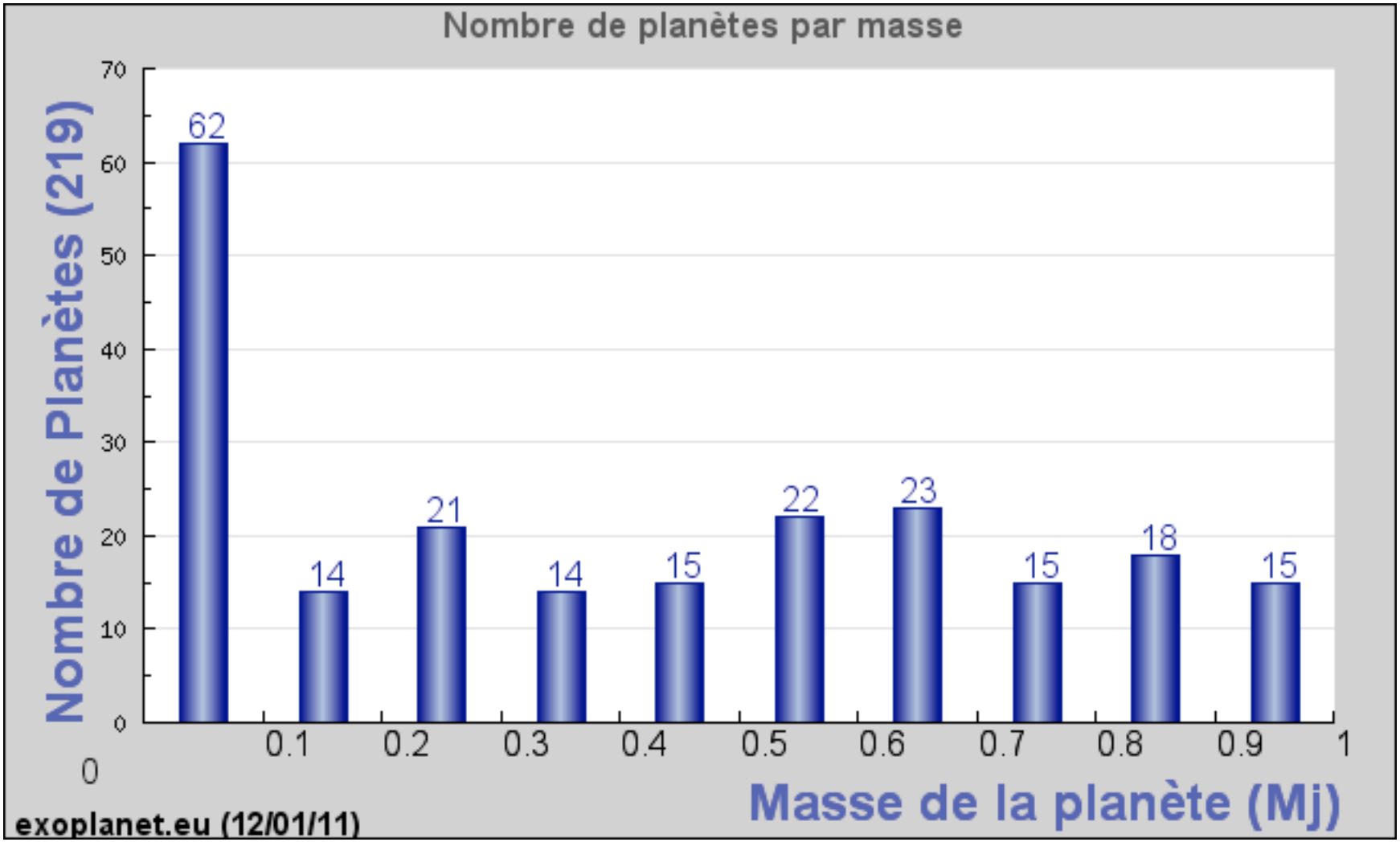
Nombre de découvertes



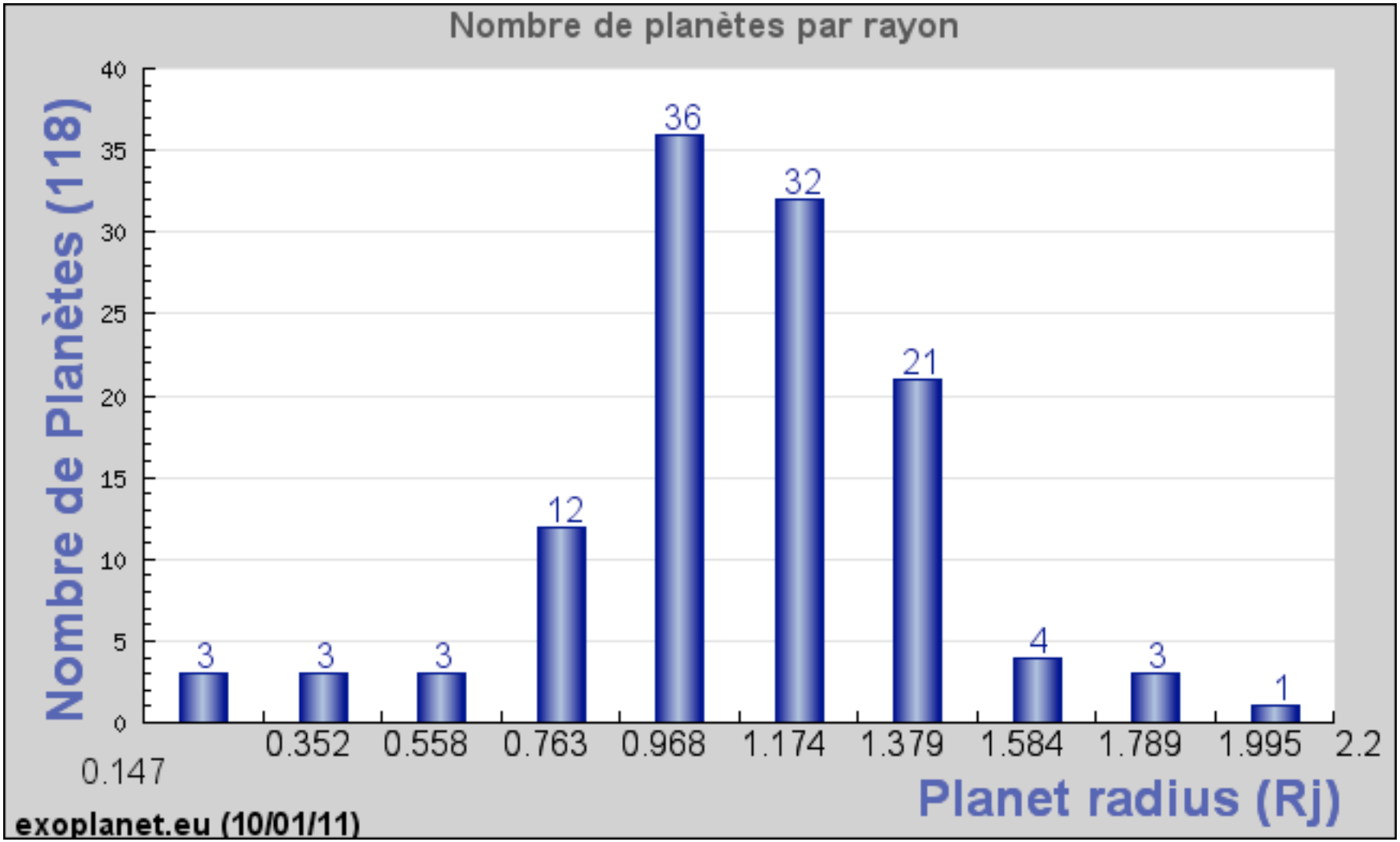
Masse


Nombre de planètes par masse
Nombre de Planètes (519)
350
300
250
200
150
100
50
0
349
75
33
23
14
10
3
7
4
1
2.5
5
7.5
10
12.5
15
17.5
20
22.5
25
0
Limite Planètes / Naines brunes ?
Masse de la planète (Mj)
exoplanet.eu (10/01/11)

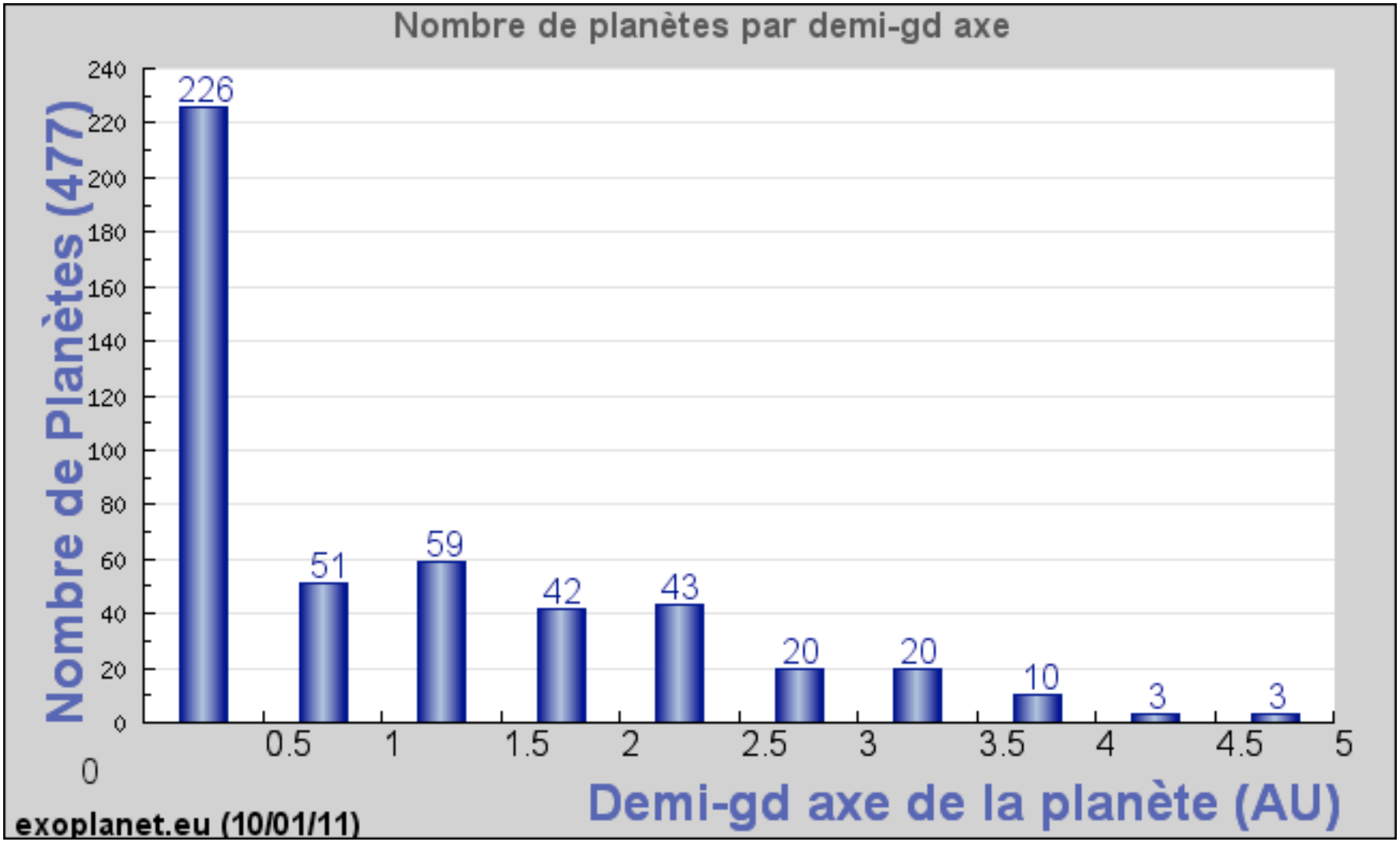
Masse < 1 $M_{Jupiter}$



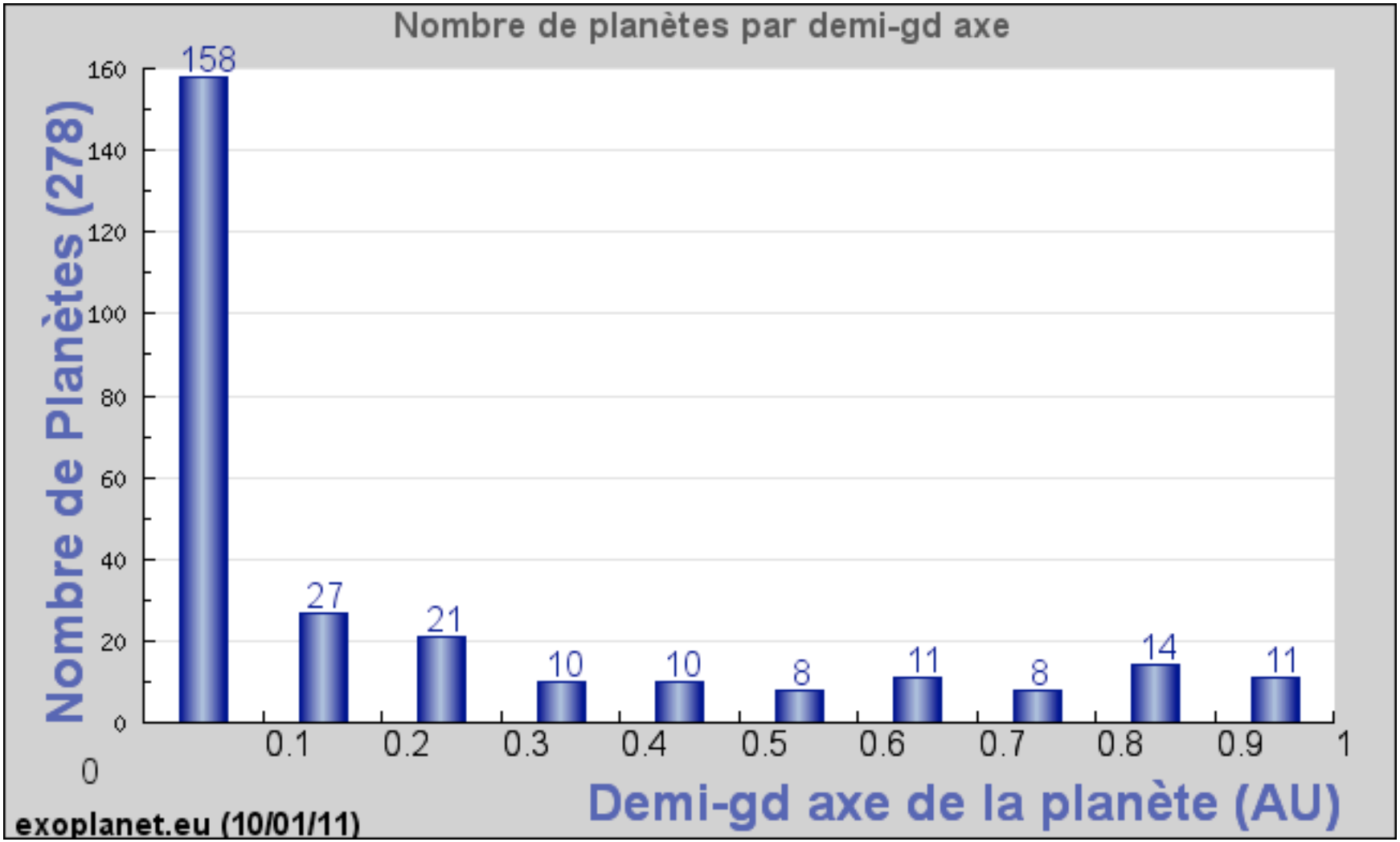
Rayon


Nombre de planètes par rayon
Nombre de Planètes (118)
40
35
30
25
20
15
10
5
0
3
3
3
12
36
32
21
4
3
1
0.147
0.352
0.558
0.763
0.968
1.174
1.379
1.584
1.789
1.995
2.2
Planet radius (Rj)
exoplanet.eu (10/01/11)

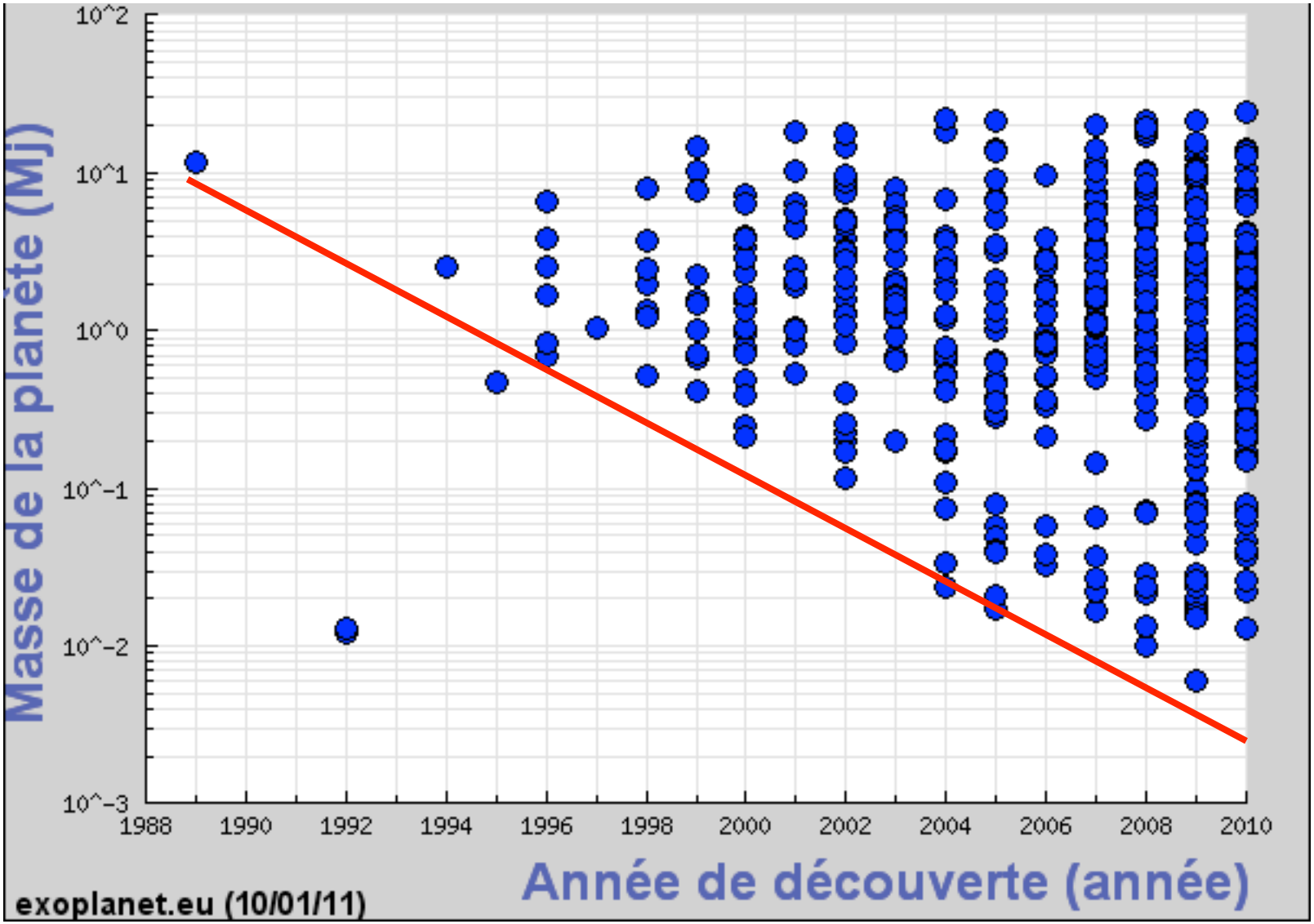
Séparation


Nombre de planètes par demi-gd axe
Nombre de Planètes (477)
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
226
51
59
42
43
20
20
10
3
3
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
0
Demi-gd axe de la planète (AU)
exoplanet.eu (10/01/11)

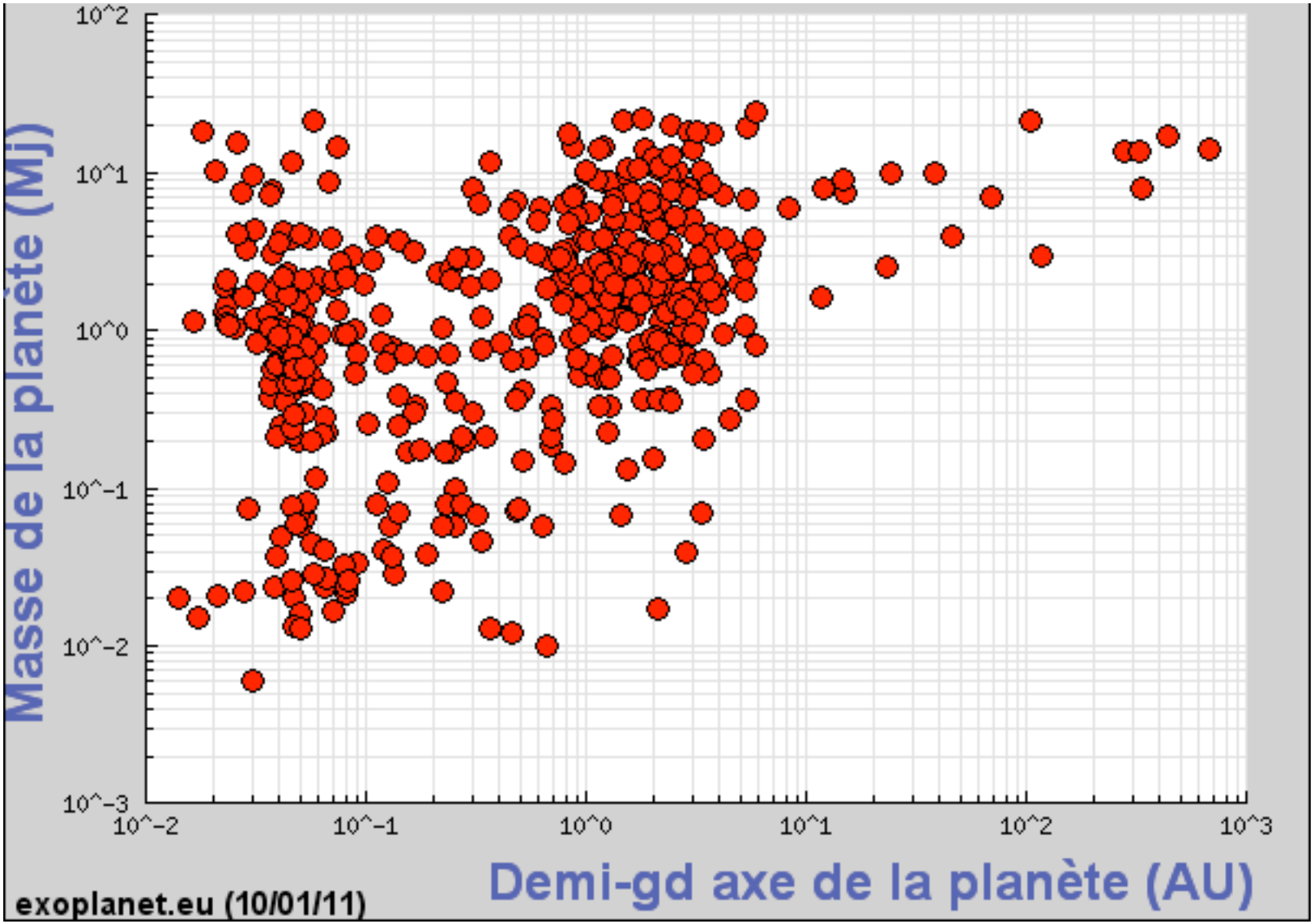
Séparation < 1 AU



Masse vs. année de découverte



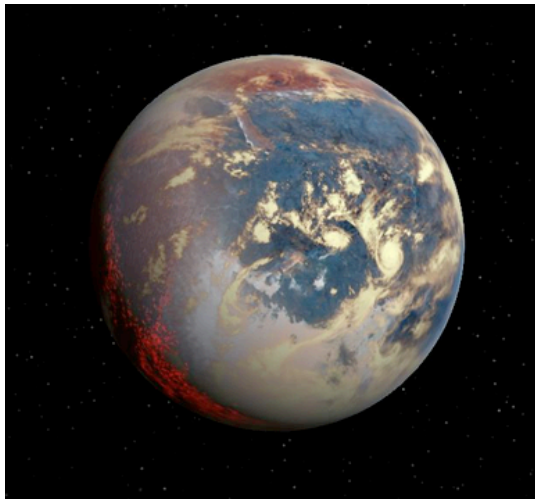
Masse vs. séparation



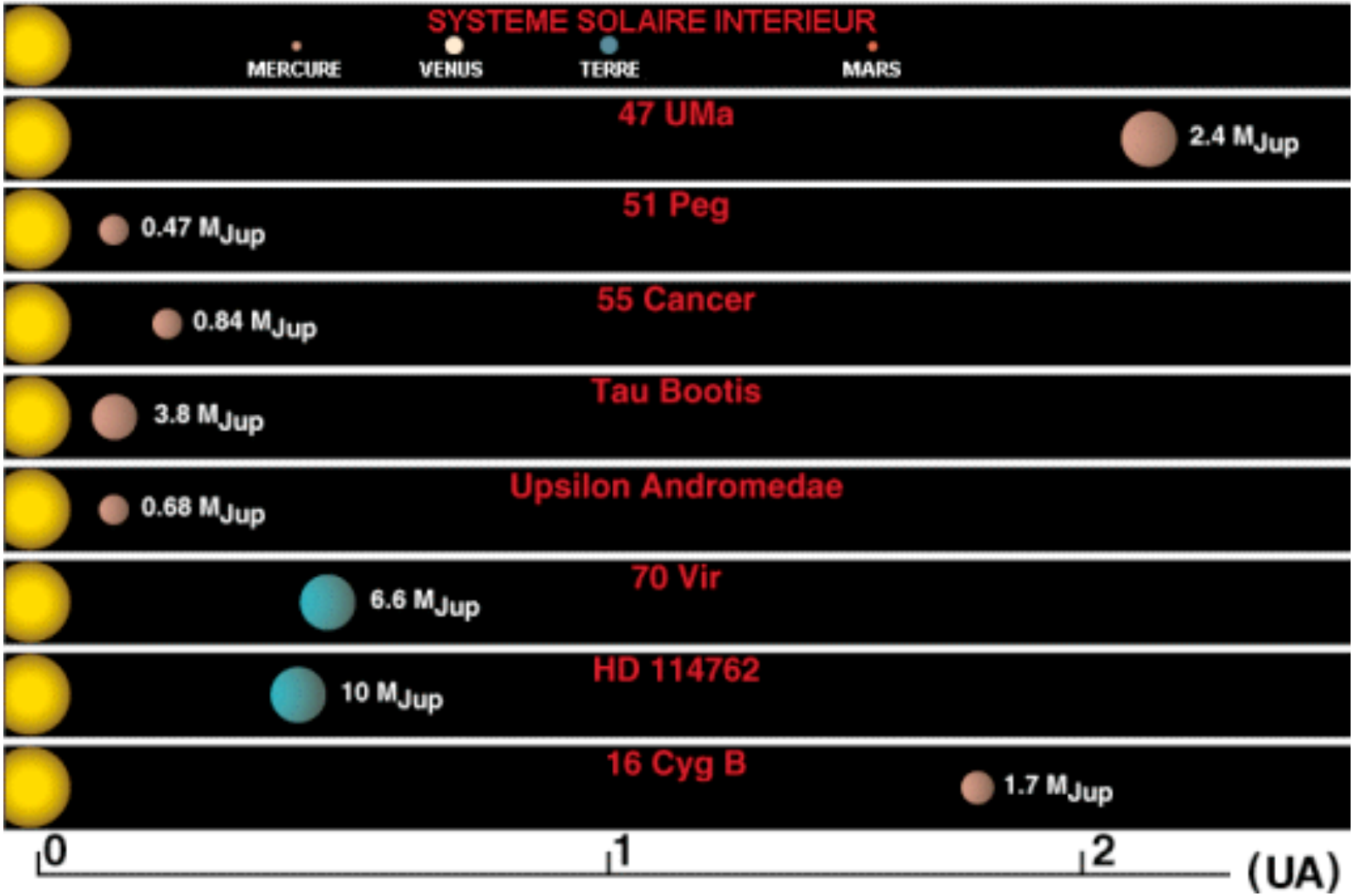
Bilan des découvertes

- plus de 500 planètes dont 410 systèmes : 50 systèmes multiples avec jusqu'à 6 planètes
- mesure des masses et éléments orbitaux (incertitude inclinaison)
- 7-10% des étoiles observées ont des planètes
- distribution de masse augmente vers les faibles masses (plus de petites planètes)
- plus petite masse: quelques masses terrestres
- plusieurs mesures de rayons (planètes en transit) ~ 100
- Neptune (> 30 M_{Terre} <1 $M_{Jupiter}$) : ~ 40
- quelques spectres mesurés => information sur l'atmosphère (H_2O, CO_2, CO, CH_4, Na, …)
- quelques planètes dans des disques de débris

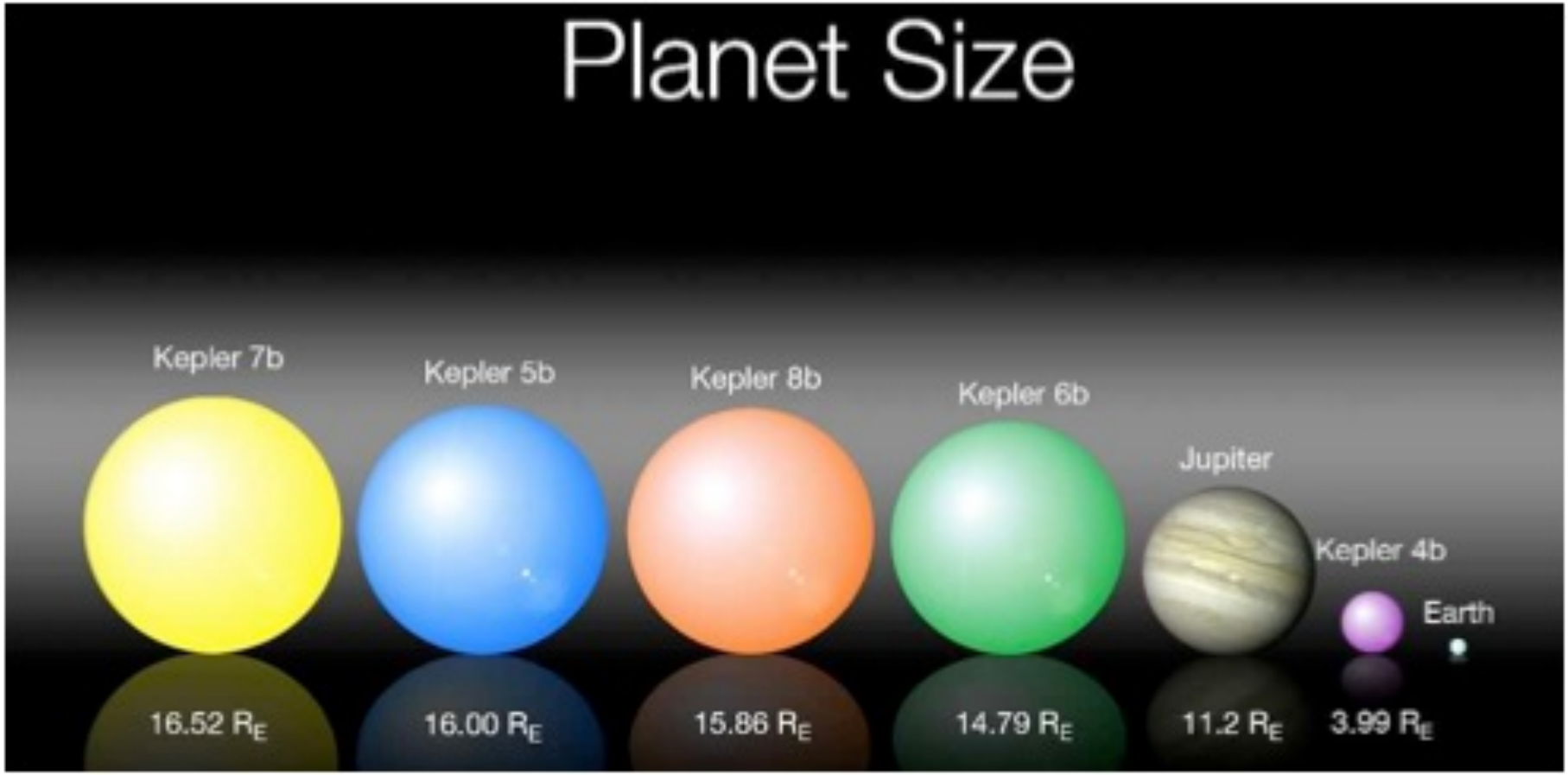
Planètes absentes dans le Syst. Solaire :
- Jupiters chauds: 0.5-1% des étoiles
- Super Terres chaudes
- planètes jeunes (qcq. Myr)
- planètes massives (> 1$M_{Jupiter}$)



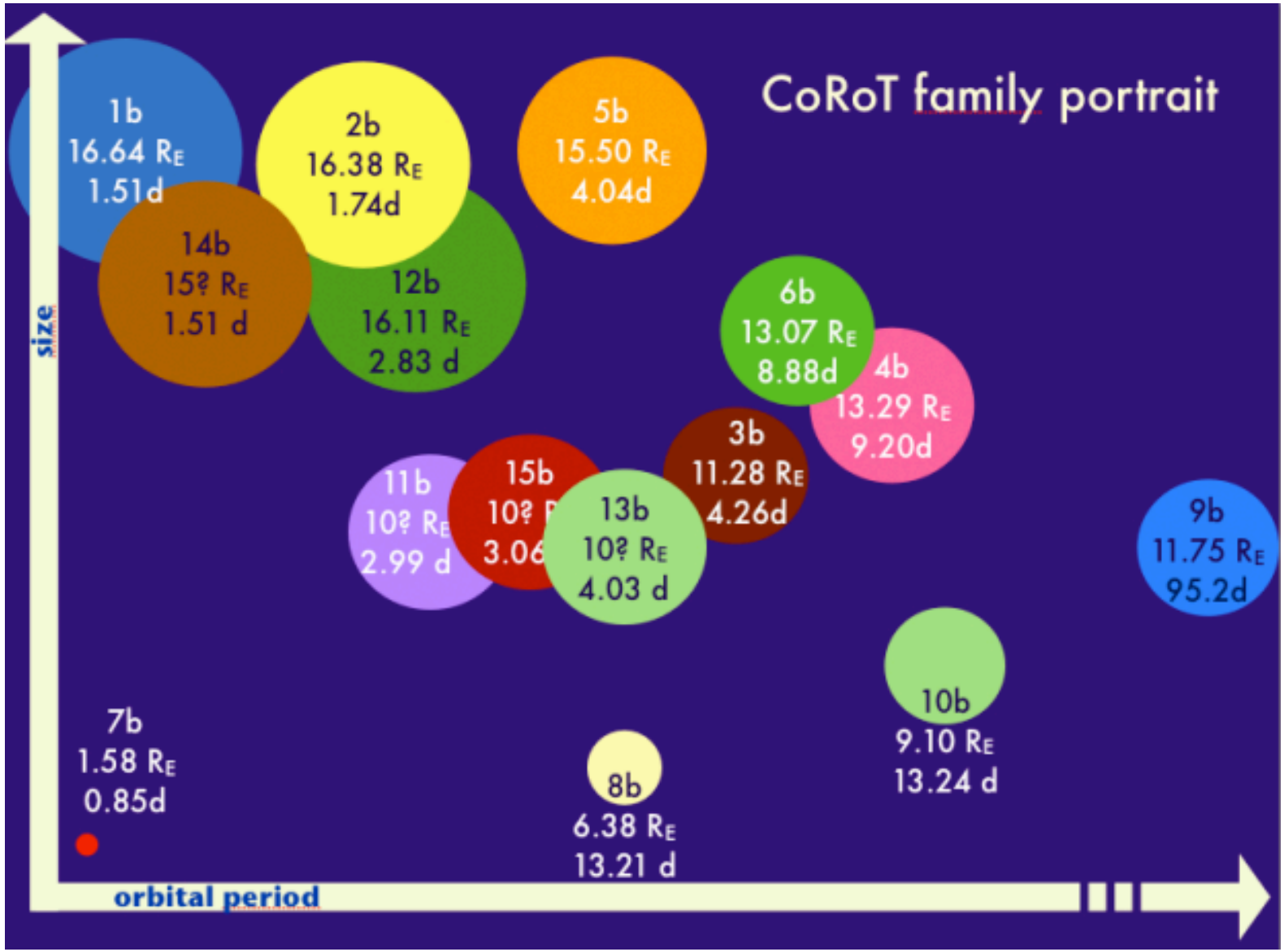
Architecture / taille



Architecture / taille



Architecture / taille



Techniques indirectes

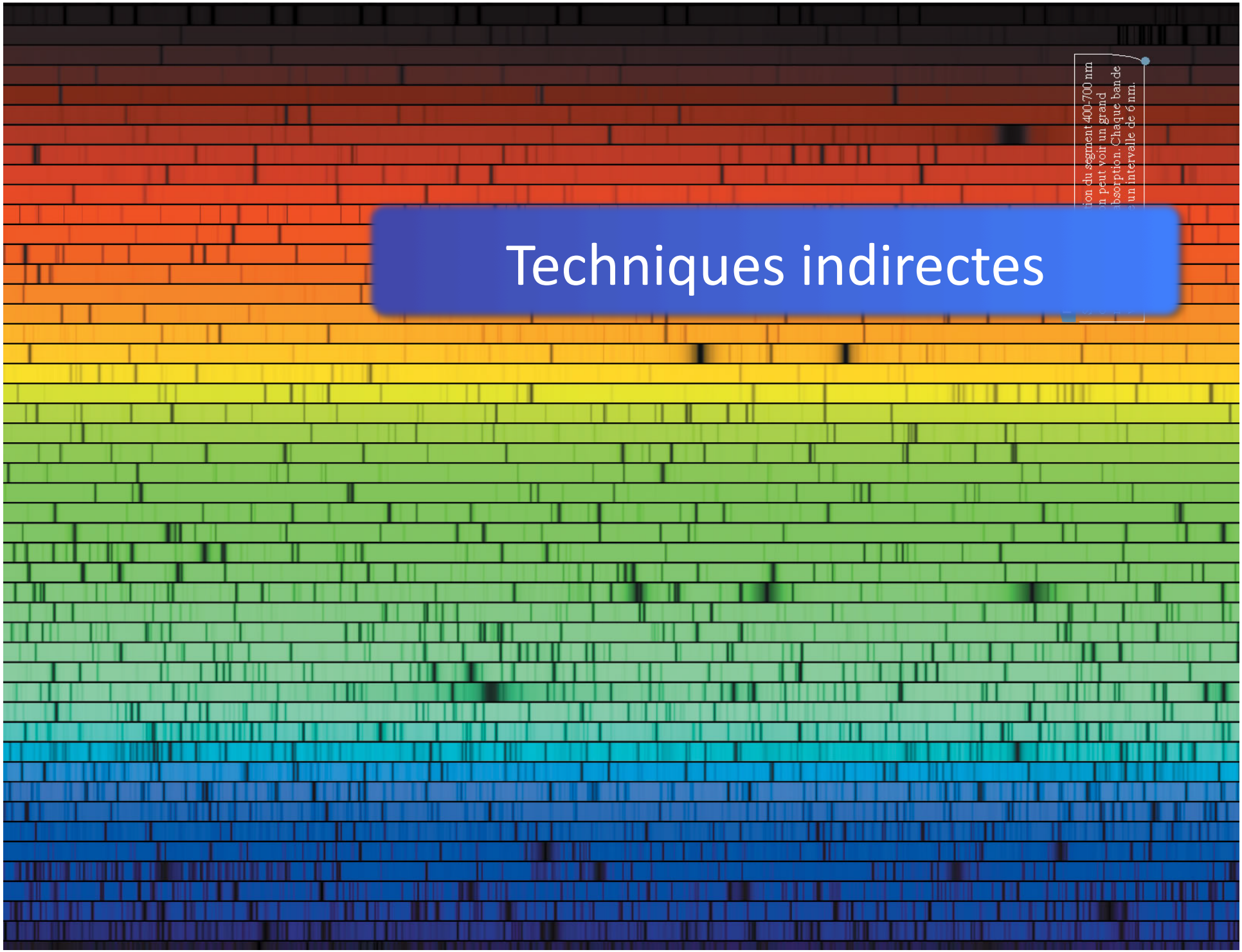
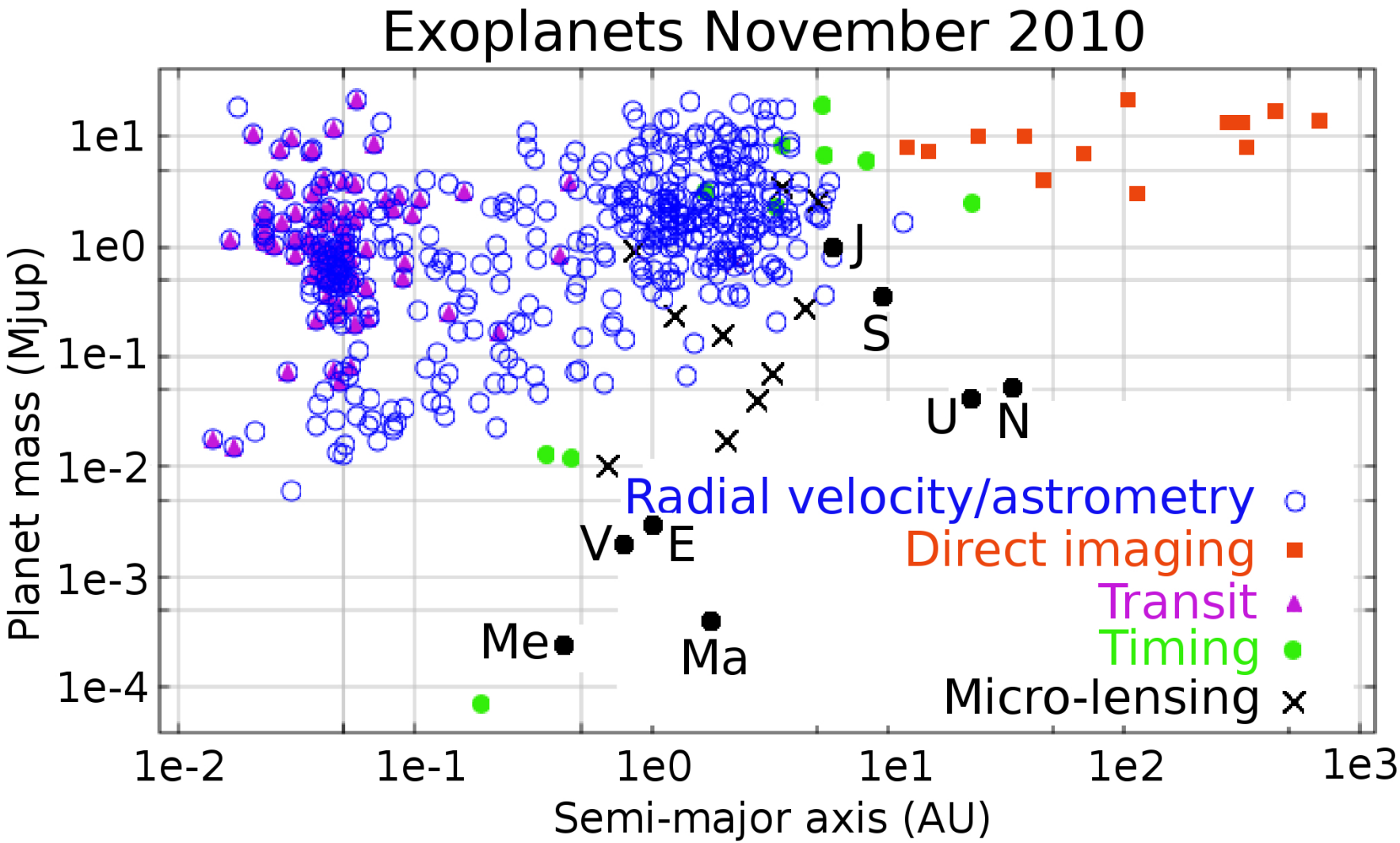
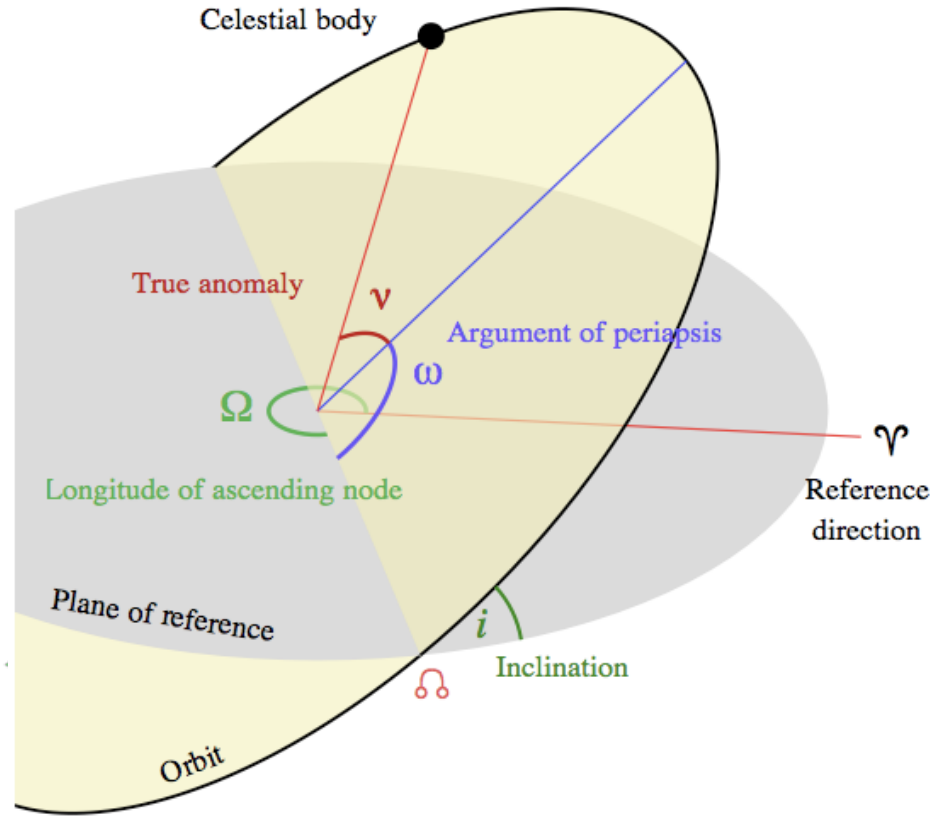


Diagramme masse vs. séparation



Principes génériques

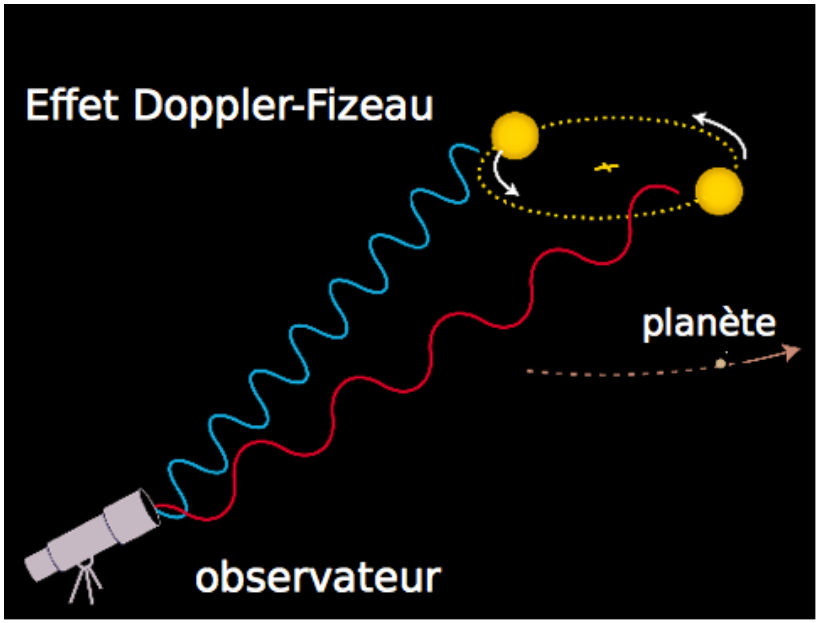
- Observation de l'étoile pour mettre en évidence des perturbations dues à des planètes
  - Soit au niveau gravitationnel (Vitesse Radiale, Astrométrie)
  - Soit au niveau photométrique (Transit, Micro-lentilles)

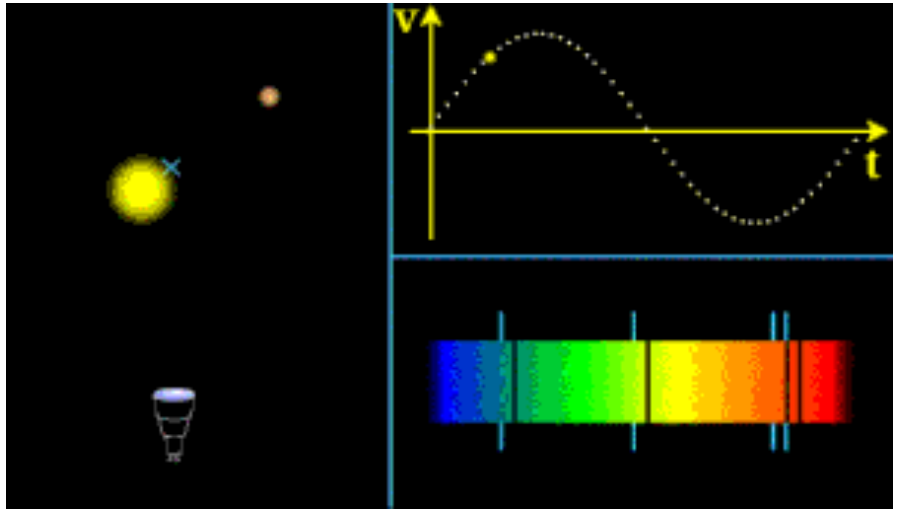


6 paramètres :

- demi grand axe : ***a***
- excentricité : ***e***
- inclinaison : ***i***
- longitude noeud ascendant : Ω
- argument périastre : ω
- anomalie : ν *(position sur orbite)*

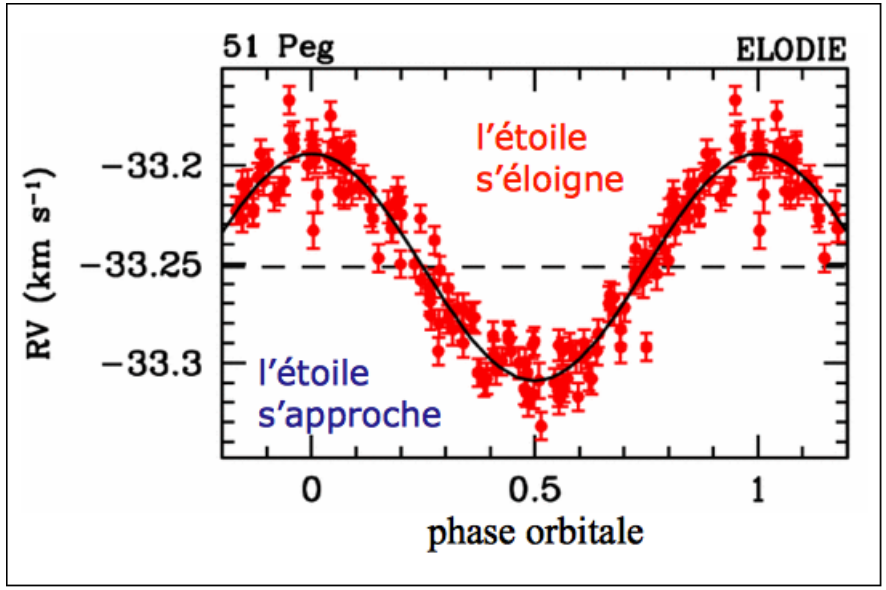
Vitesses Radiales





$$V_R(t) = K \sin\left(\frac{2\pi . t}{P}\right)$$

$$K = \frac{M_p \sin i}{M_*}\sqrt{\frac{GM_*}{a}}$$

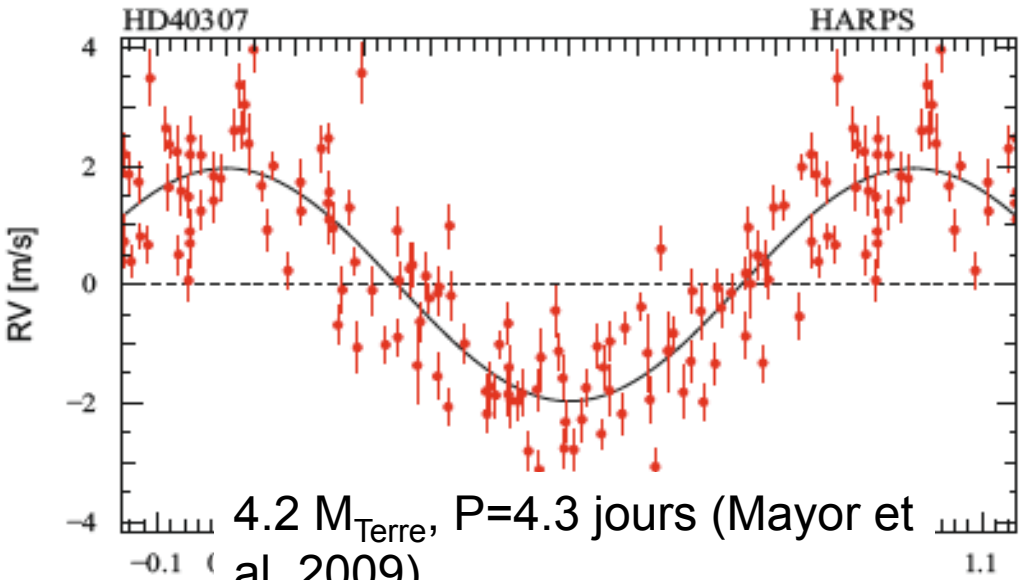


Mayor & Queloz, Nature 378, 355 (1995)

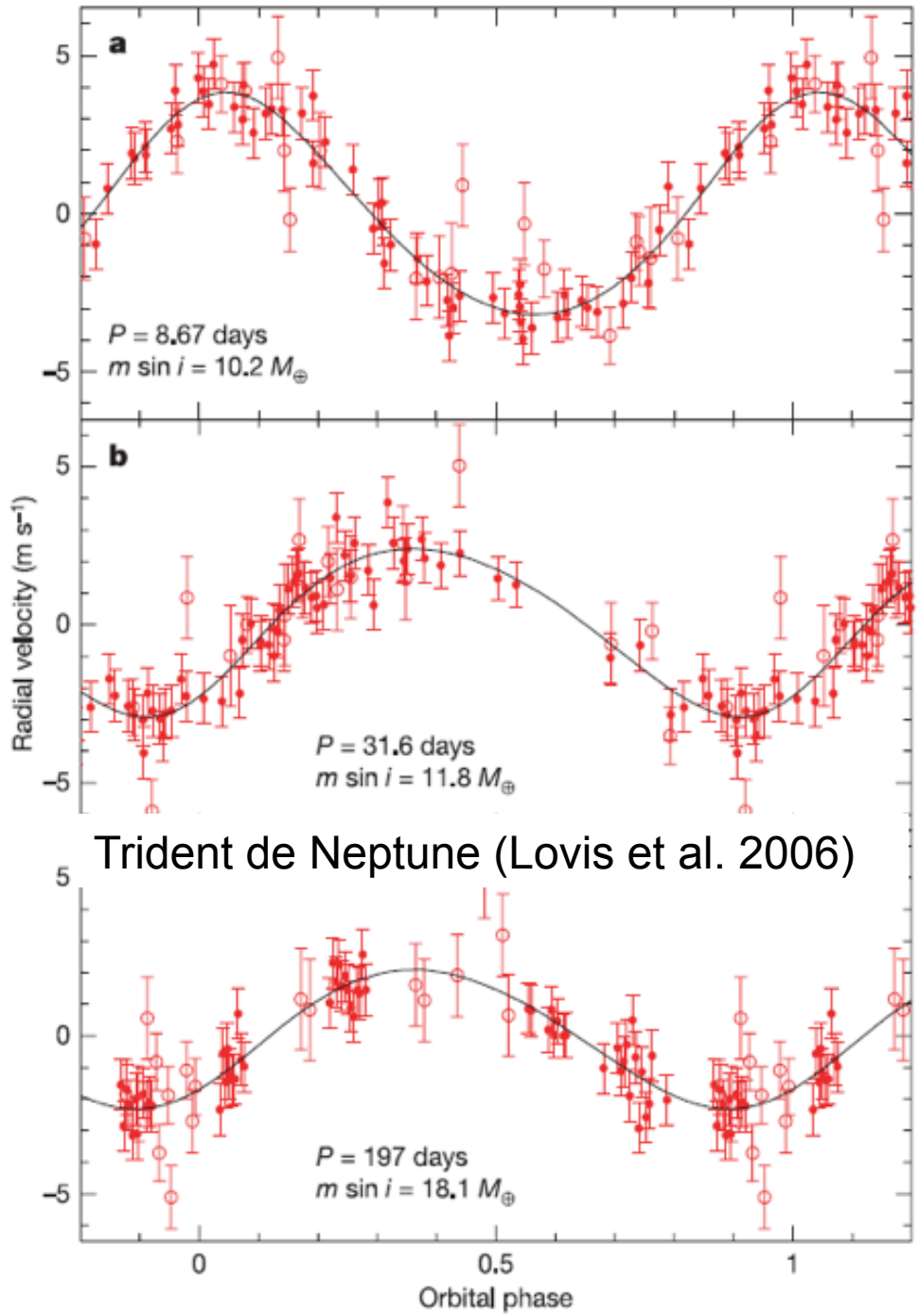
Vitesses Radiales

Jupiter	5 AU	12.7 $m.s^{-1}$
Jupiter	1 AU	28.7 $m.s^{-1}$
Neptune	1 AU	28.7 $m.s^{-1}$
Super Terre ($5M_T$)	0.1 AU	1.4 $m.s^{-1}$
Super Terre ($5M_T$)	1.0 AU	0.45 $m.s^{-1}$
Terre	1.0 AU	9 $cm.s^{-1}$

Detection favorable :
- ✓ planètes massives
- ✓ planètes proches de l'étoile
- ✓ indépendant de la distance de l'étoile



4.2 M_{Terre}, P=4.3 jours (Mayor et al. 2009)



Trident de Neptune (Lovis et al. 2006)

Vitesses Radiales

Caractéristiques de HARPS

Champ de vue : 1″

Étendue spectrale : 380-690 nm

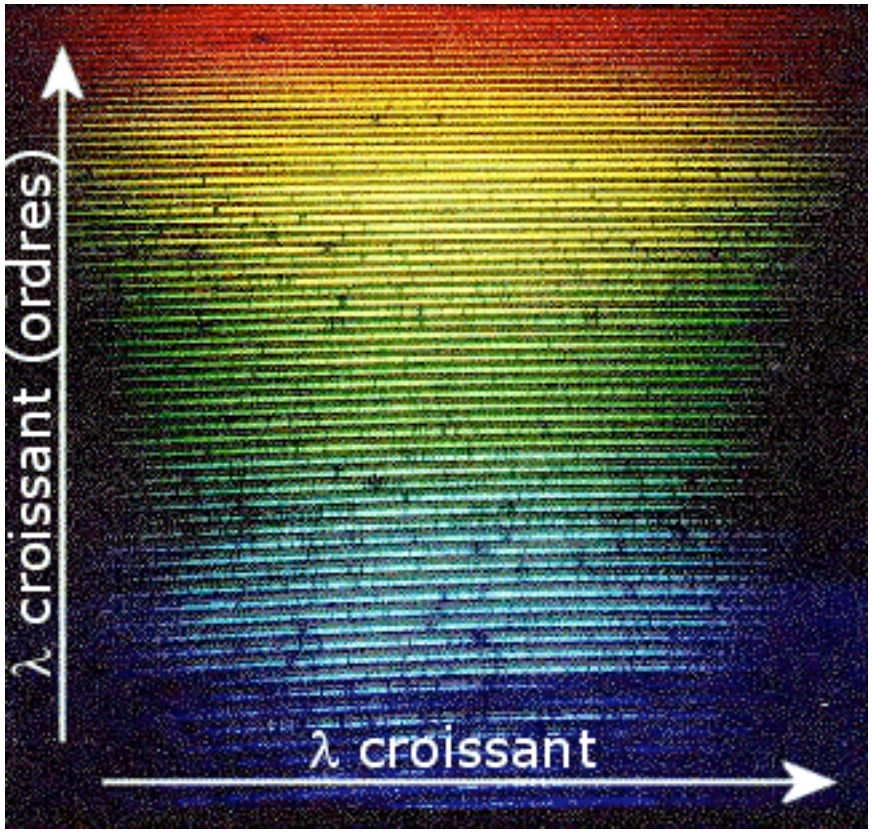
Résolution spectrale : 90 000

Format du spectre : 68 ordres

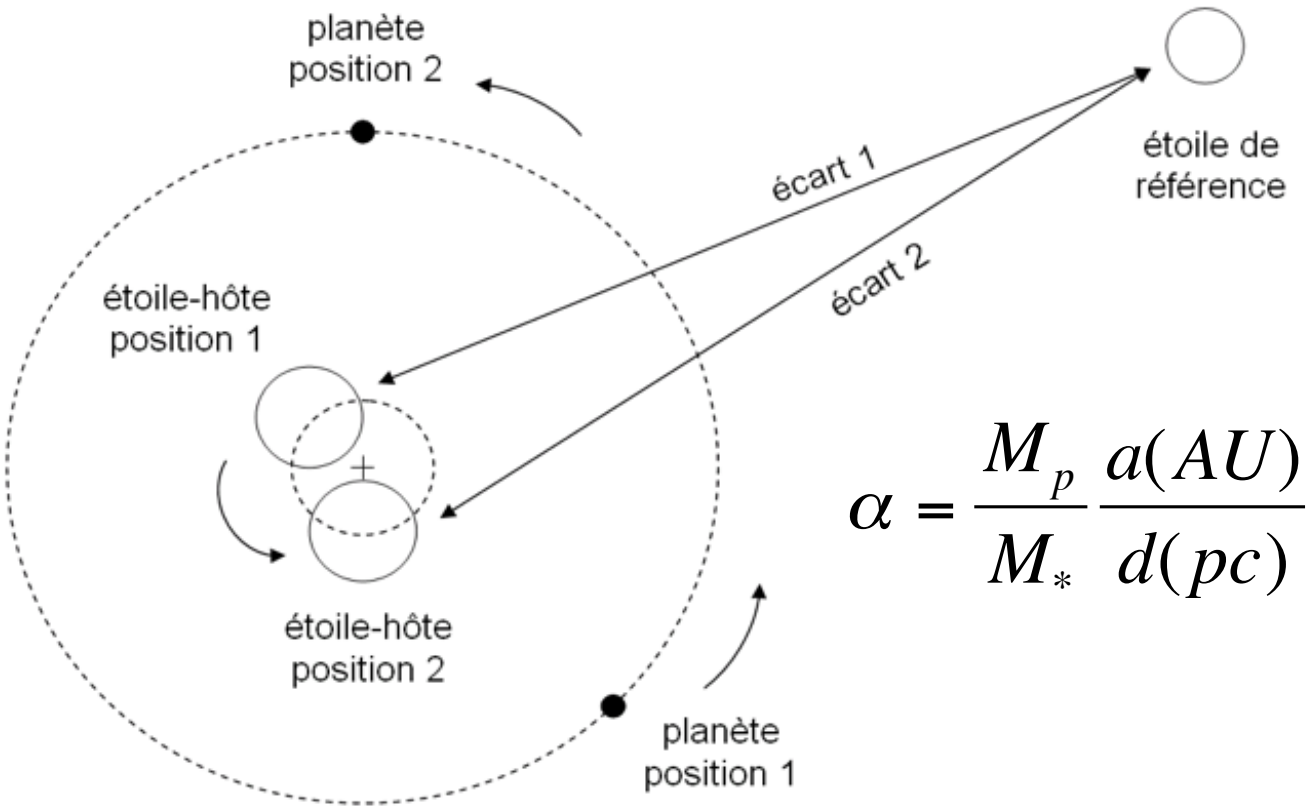
2 CCD 2k × 4k

Lampe Th-Ar

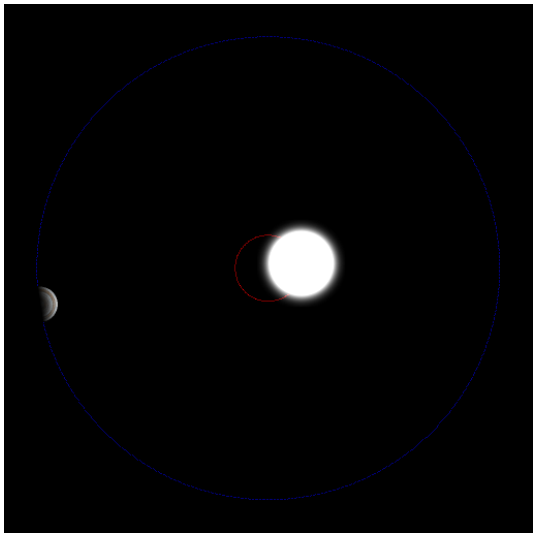
Précision < 1 m.s^{-1}



Astrométrie



$$\alpha = \frac{M_p}{M_*} \frac{a(AU)}{d(pc)}$$

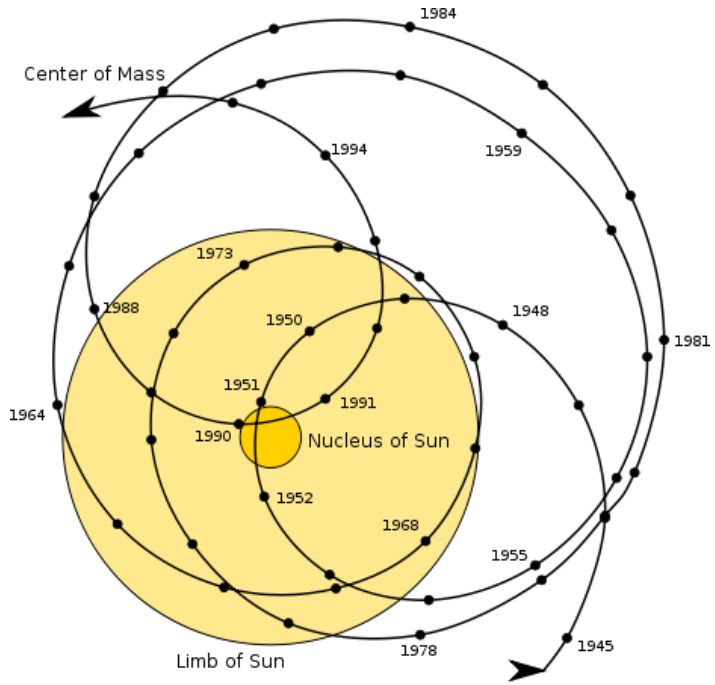


Mesure du mouvement d'une étoile
Sur le plan du ciel par rapport à
une ou des références

Detection favorable :
- ✓ planètes massives
- ✓ planètes éloignées de l'étoile
- ✓ proche du soleil

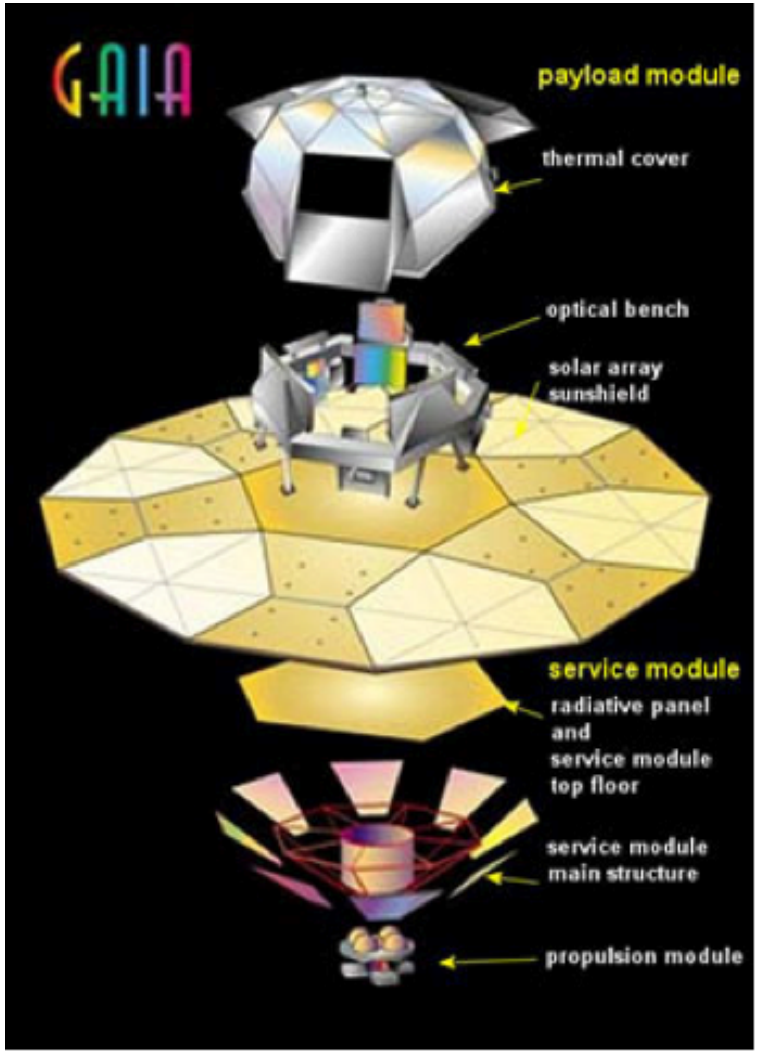
Astrométrie

Jupiter	5 AU	0.5 mas
Jupiter	1 AU	0.1 mas
Jupiter	10 AU	10.0 mas
Super Terre ($5M_T$)	1.0 AU	1.5 μas
Terre	1.0 AU	0.3 μas



Mouvement apparent du Soleil vu de 10pc

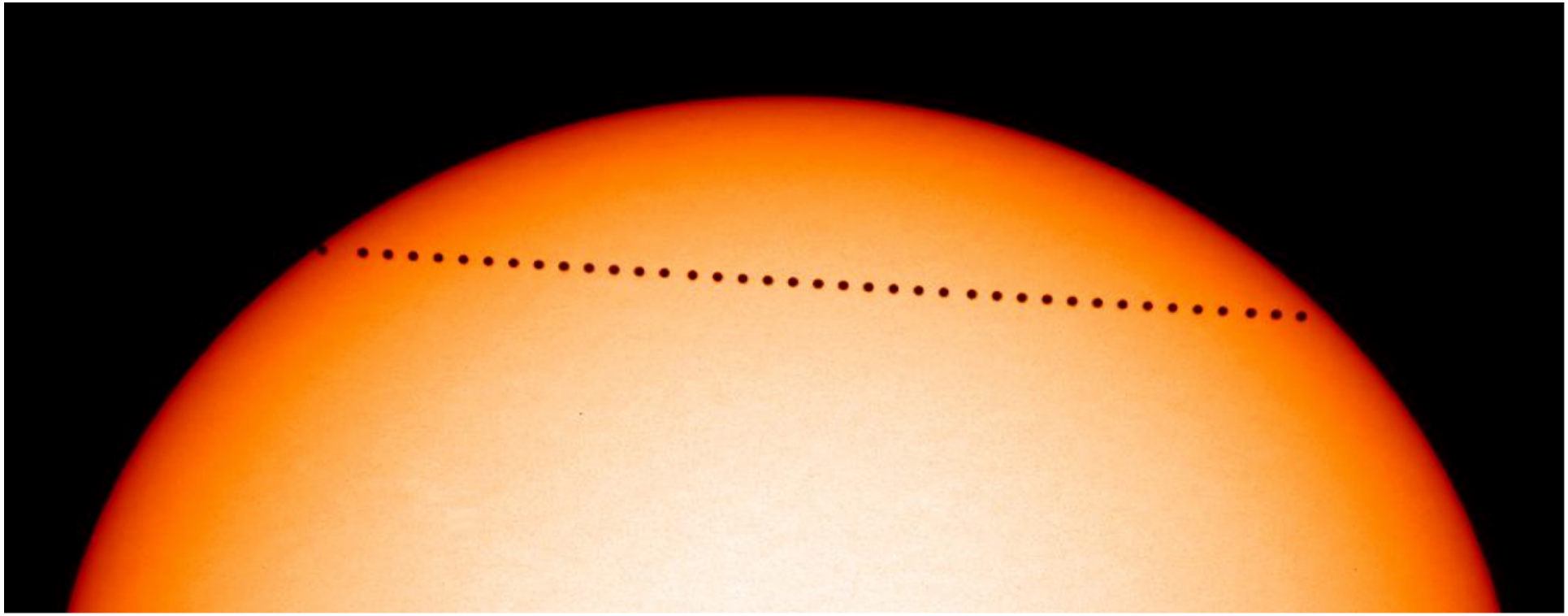
Astrométrie



Satellite GAIA:

- Satellite en rotation autour d'un axe
- couverture complète du ciel
- 2 télescopes (1,4 × 0,5 m^2) visant dans 2 directions à 106°
- 180 CCD de 4500 × 1966 pixels (!)
- précision de [4, 10, 200] µsa à m_V = [10, 15, 20]
- traitement de 10^9 étoiles

Transit

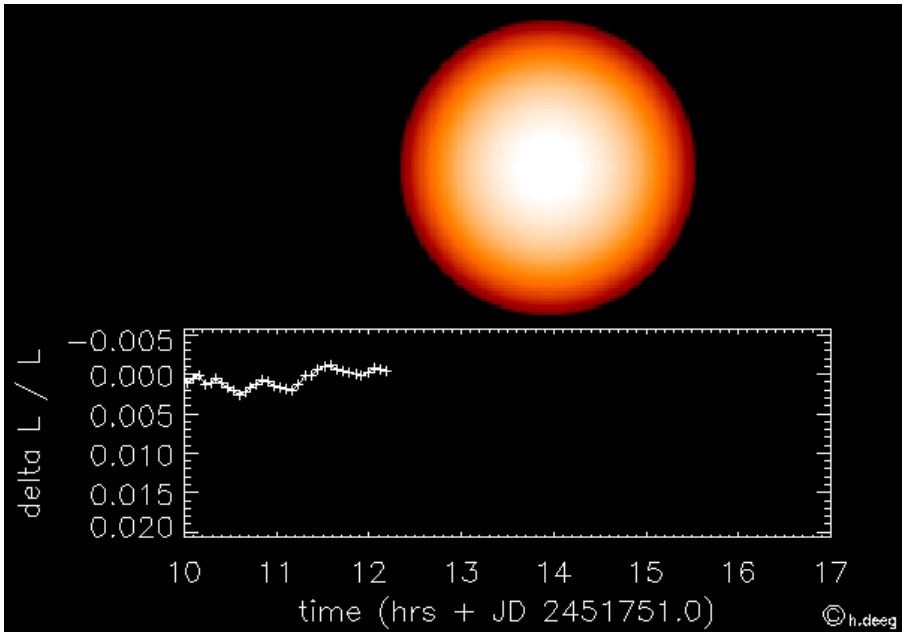


Transit

Profondeur transit:

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$$

Jupiter / Terre = 10^{-2} / 10^{-4}



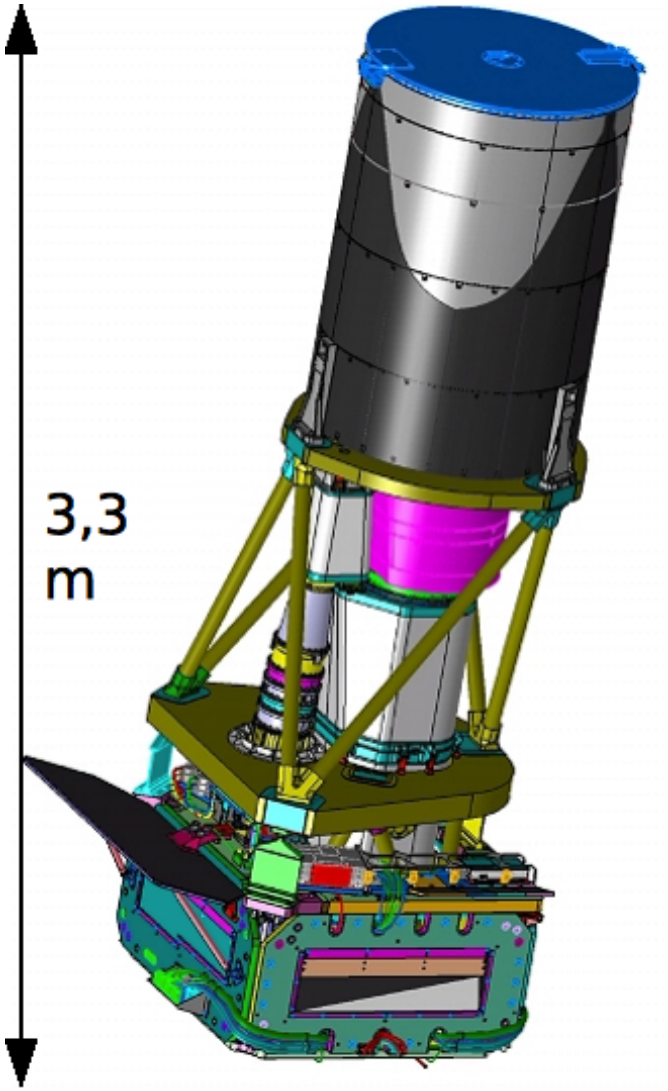
Durée transit:

$$t(hrs) = \left(\frac{R_*}{R_{sun}}\right)\left(\frac{P}{1yr}\right)^{1/3}\left(\frac{M_*}{M_{sun}}\right)^{-1/3}\left(1-\frac{d^2}{R_*^2}\right)^{-1/2}$$

Jupiter / Terre = quelques heures

Detection favorable :
- ✓ planètes de grands diamètres
- ✓ planètes proches de l'étoile

Transit

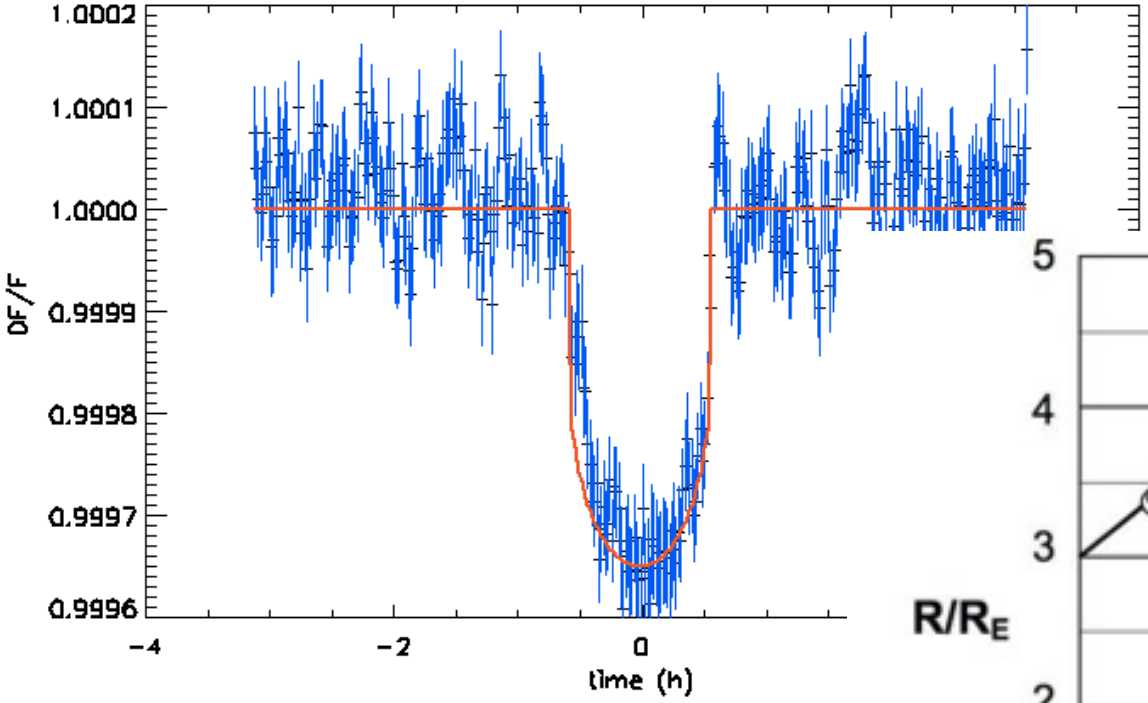


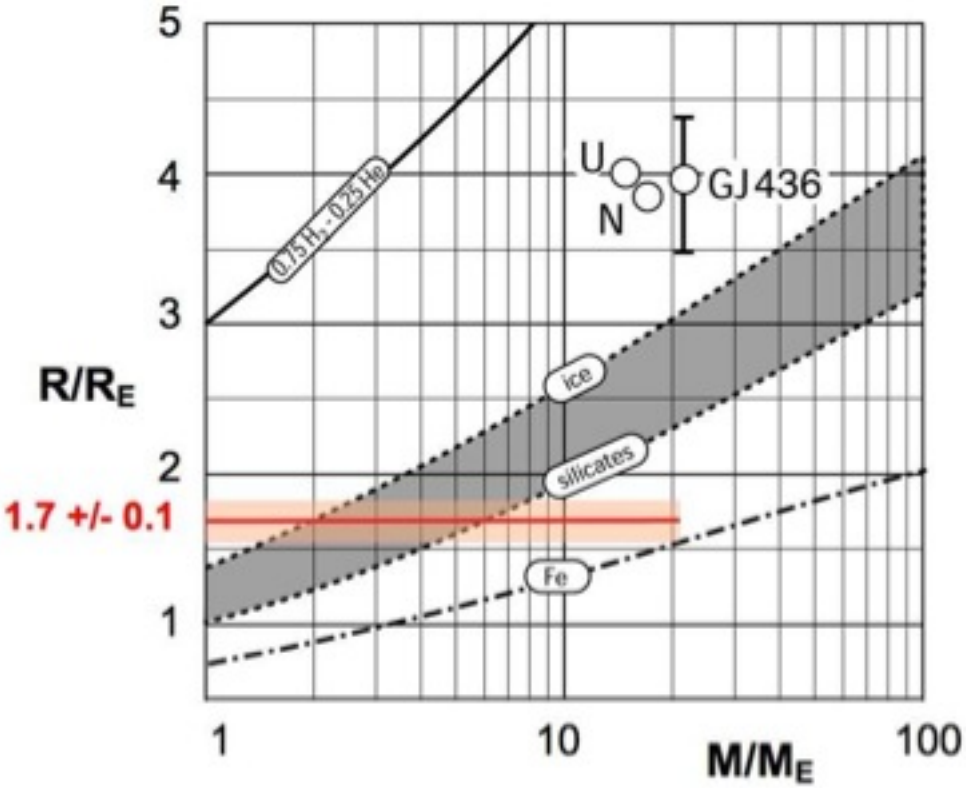
Satellite COROT (CNES/ESA):

- Mission spatiale du CNES avec des partenaires européens (170 M€)
- Télescope de 27 cm, champ de 3,5°×2,8°, 4 détecteurs CCD
- Satellite : 600 kg
- Orbite polaire basse : 900 km
- Lancé le 27/12/06 pour 2,5 ans
- Objectifs : sismologie stellaire & détection d'exoplanètes
- 5 programmes longs de 6 mois

Mais aussi KEPLER (NASA) …

Transit

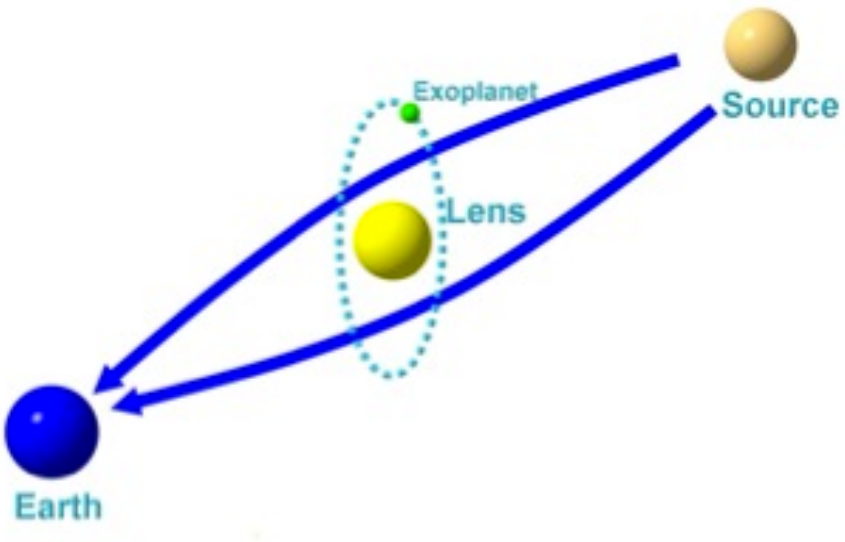


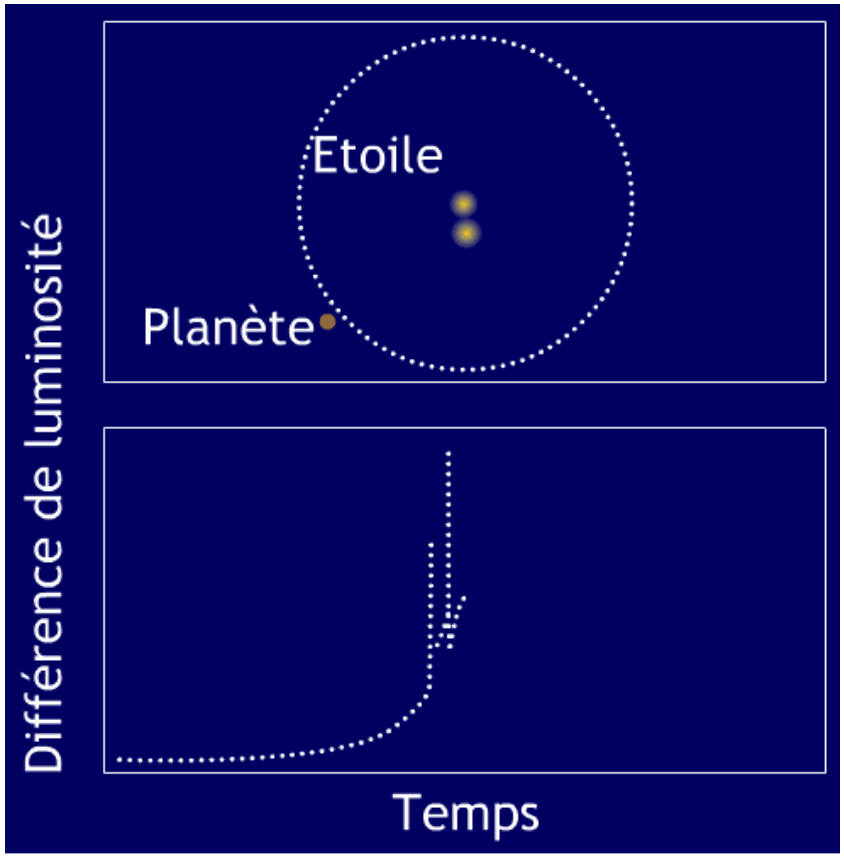


Transit de Corot 7b découverte par COROT (Léger et al. 2009)

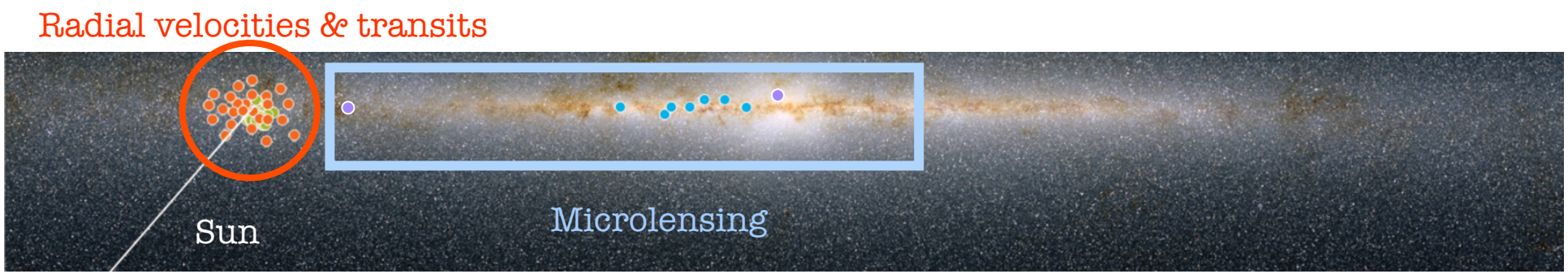
$R = 1.72\ R_{terre}$
a = 0.017 AU
P = 0.85 jours

Micro-lentilles





Mesure :
- rapport de masse: M_p/M_*
- séparation angulaire



Micro-lentilles cibes

$$R_E(AU) = 8.1\left(\frac{M_L}{M_{sun}}\right)^{1/2}\left(\frac{D_S}{8kpc}\right)^{1/2}\left[\left(1-\frac{D_L}{D_S}\right)\frac{D_L}{D_S}\right]^{1/2}$$

$$A(t) = \frac{u^2(t)+2}{u(t)\left[u^2(t)+2\right]^{1/2}}$$

$u(t)$ Distance projetée entre source et lentille en unité de R_E

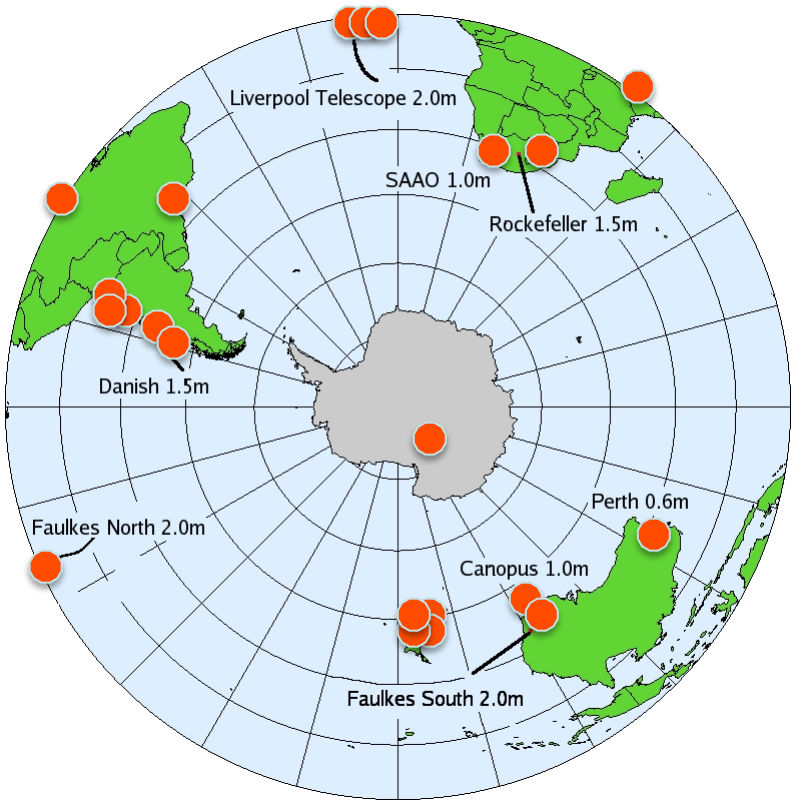
$$t_E = 69.9\left(\frac{M_L}{M_{sun}}\right)^{1/2}\left(\frac{D_S}{8kpc}\right)^{1/2}\left[\left(1-\frac{D_L}{D_S}\right)\frac{D_L}{D_S}\right]^{1/2} v_{200}^{-1}\frac{D_L}{D_S}$$

Étoile : plusieurs jours

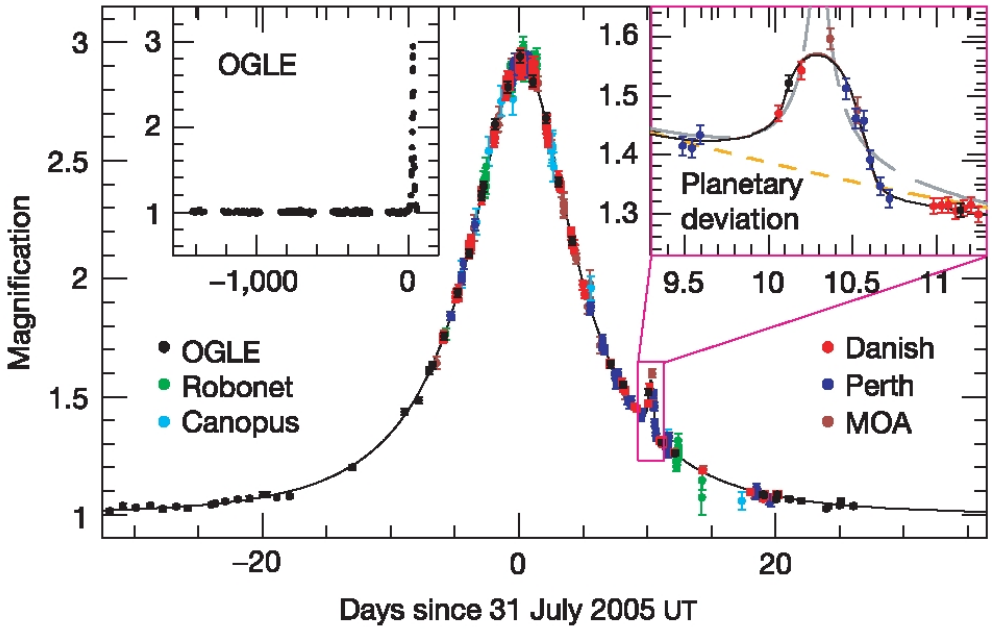
Jupiter : 1 jour

Terre : 2 heures

Micro-lentilles



Beaulieu et al. 2006



$$M_* = 0.22^{+0.21}_{-0.11}\ M_{\mathrm{SUN}}$$

$$M_{\mathrm{p}} = 5.5^{+5.5}_{-2.7}\ M_{\mathrm{EARTH}}$$

$$a = 2.6^{+1.5}_{-0.6}\ \mathrm{AU}$$

Réseau de télescopes au sol pour couverture continue (~20 télescopes)

Techniques directes

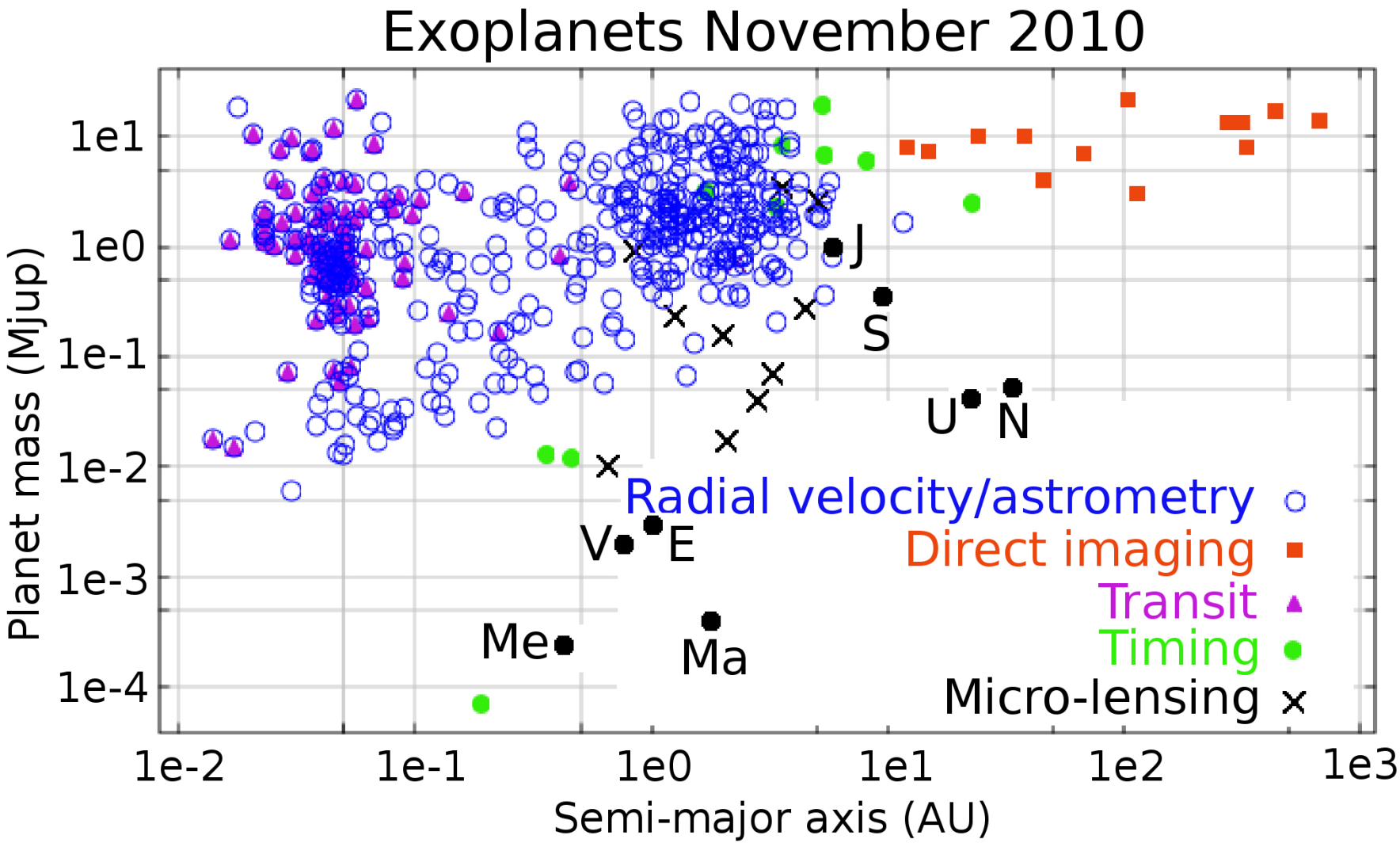
Les techniques directes

Avantages vs. méthodes indirectes:

- ✓ identification rapide
- ✓ accès aux longues périodes
- ✓ pas de limitations sur la configuration
- ✓ pas de limitations sur le type stellaire
- ✓ mesure des photons de la planètes => spectro/ polarimétrie => atmosphères
- ✓ recherche de vie possible

Mais c'est très difficile !!!!

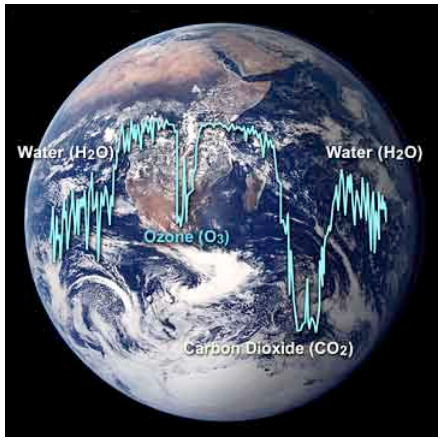
Diagramme masse vs. séparation



Motivations astrophysiques

- architecture des systèmes planétaires
- formation des planètes : core accretion / instabilités gravitationelles
- composition des atmosphères planétaires (gaz absorbants)
- présence et caractéristiques des nuages
- structure des atmosphères planétaires (distributions verticales des gaz/ nuages)
- composition et structure des surfaces planétaires (si présente et visible à travers l'atmosphère)
- variation temporelle de la composition et structure des atmosphères et surfaces (due aux saisons, orbites excentriques)
- vitesse de rotation de la planète
- détection de planètes inconnues dans les sytèmes connus
- propriétés des poussières exo-zodiacales
- morphologie des disques circumstellaires ...

Les observables



- *Position dans l'image : x(t), y(t)* [distances projetées]

⇒ position orbitale (t)

paramètres orbitaux, architecture des systèmes planétaires, distribution de la poussière

- *flux and flux polarisé: F(λ,t), P(λ,t)*

⇒ accès au spectre => physique et chimie de l'atmosphère (composition, température, pression, masse, gravité)

⇒ accès au degré de polarisation => physique de l'atmosphère (nuages/brumes, océans, sols, végétations)

⇒ variations temporelles (saisons, anneaux, excentricité)

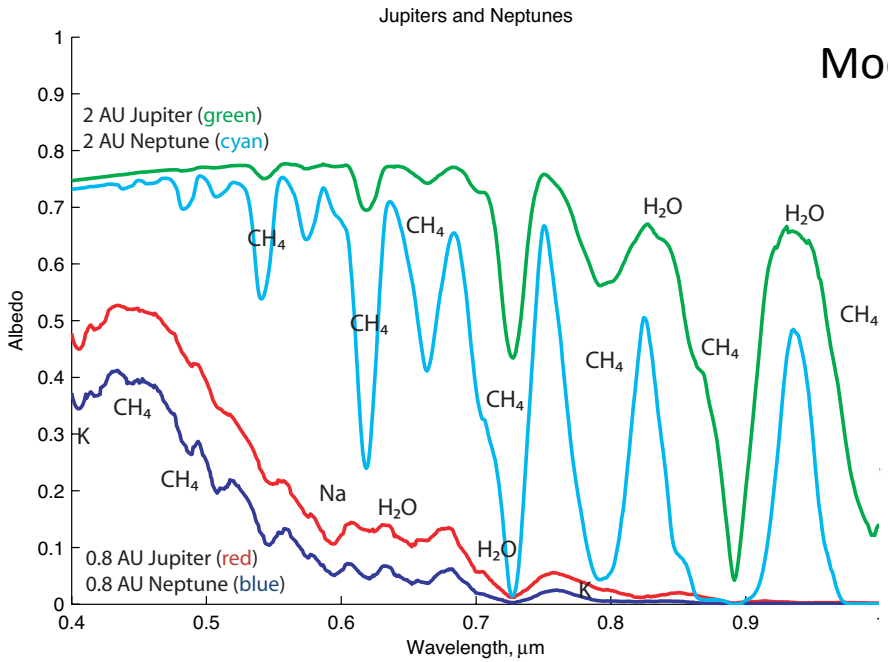
⇒ bio signatures, habitabilité

La détection directe est un outil pour caractériser les atmosphères exoplanetaires

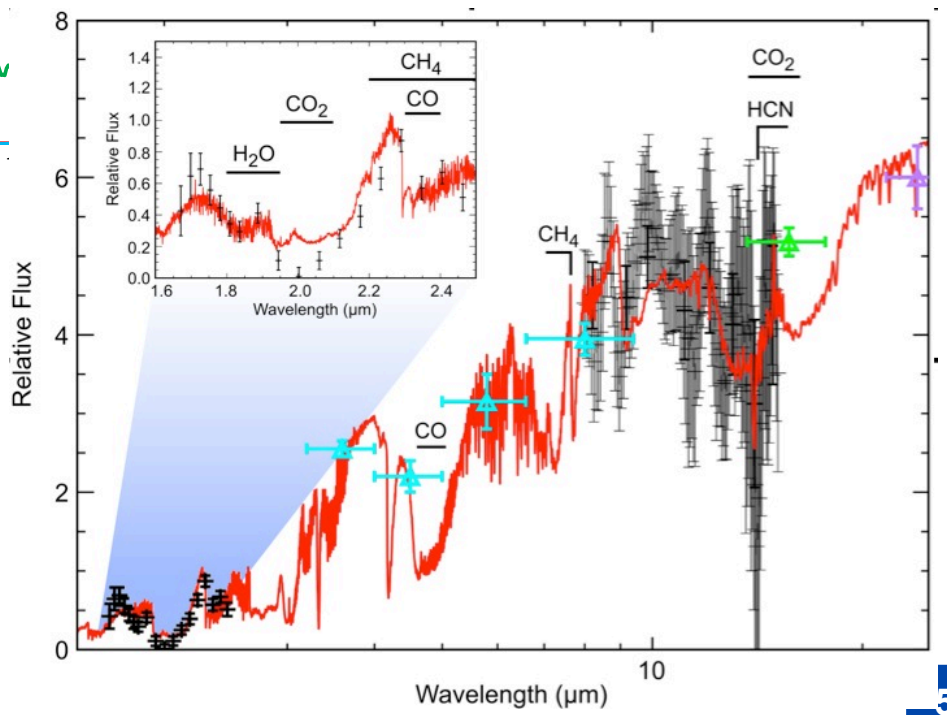
Toutes les λ sont intéressants du visible à l'IR moyen

Signatures spectrales

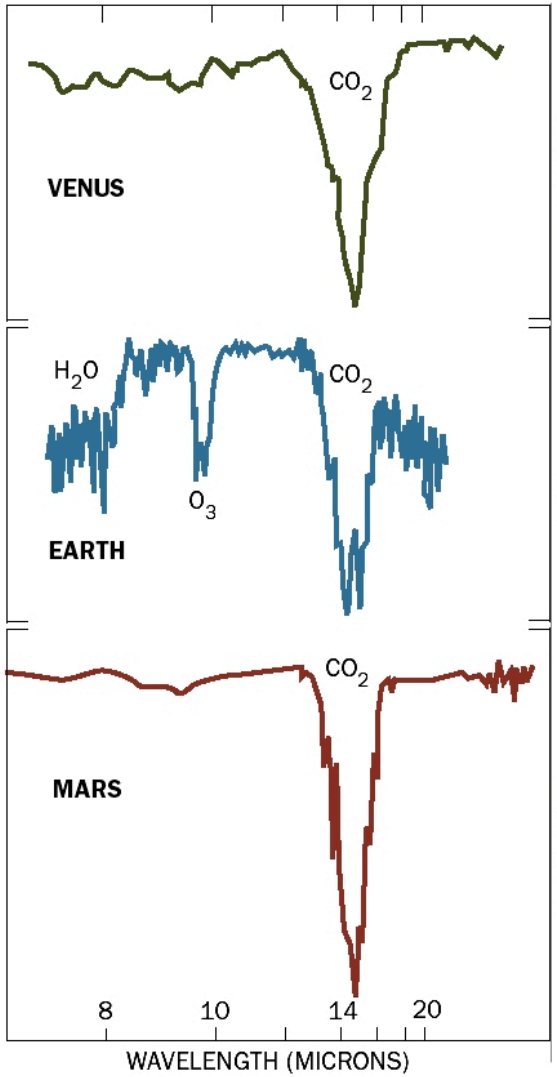
Modélisation de planètes Géantes

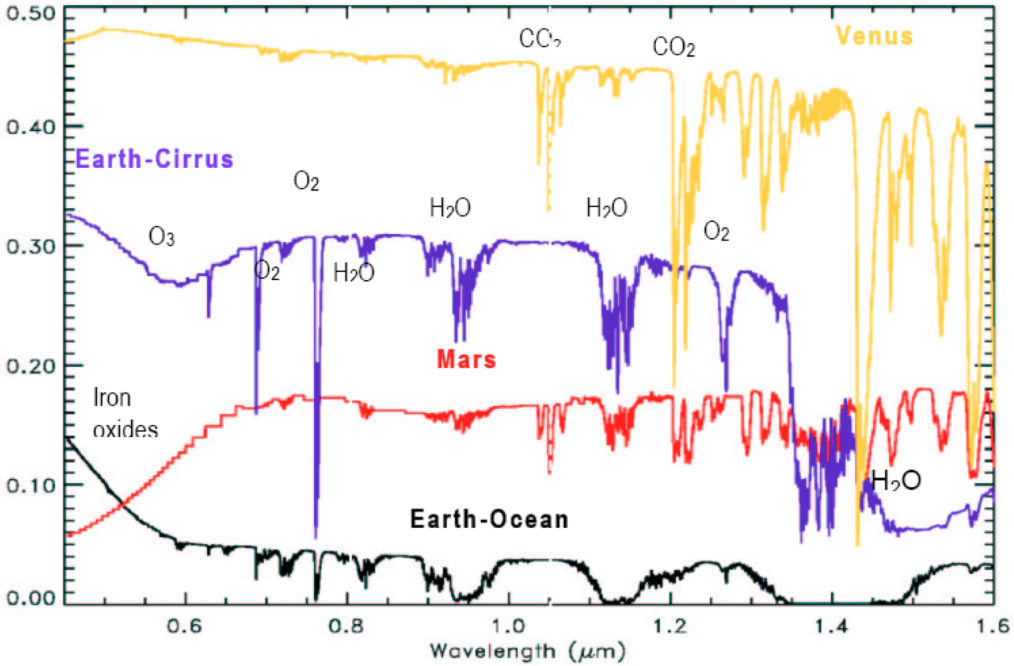


Mesures sur Jupiter chaud

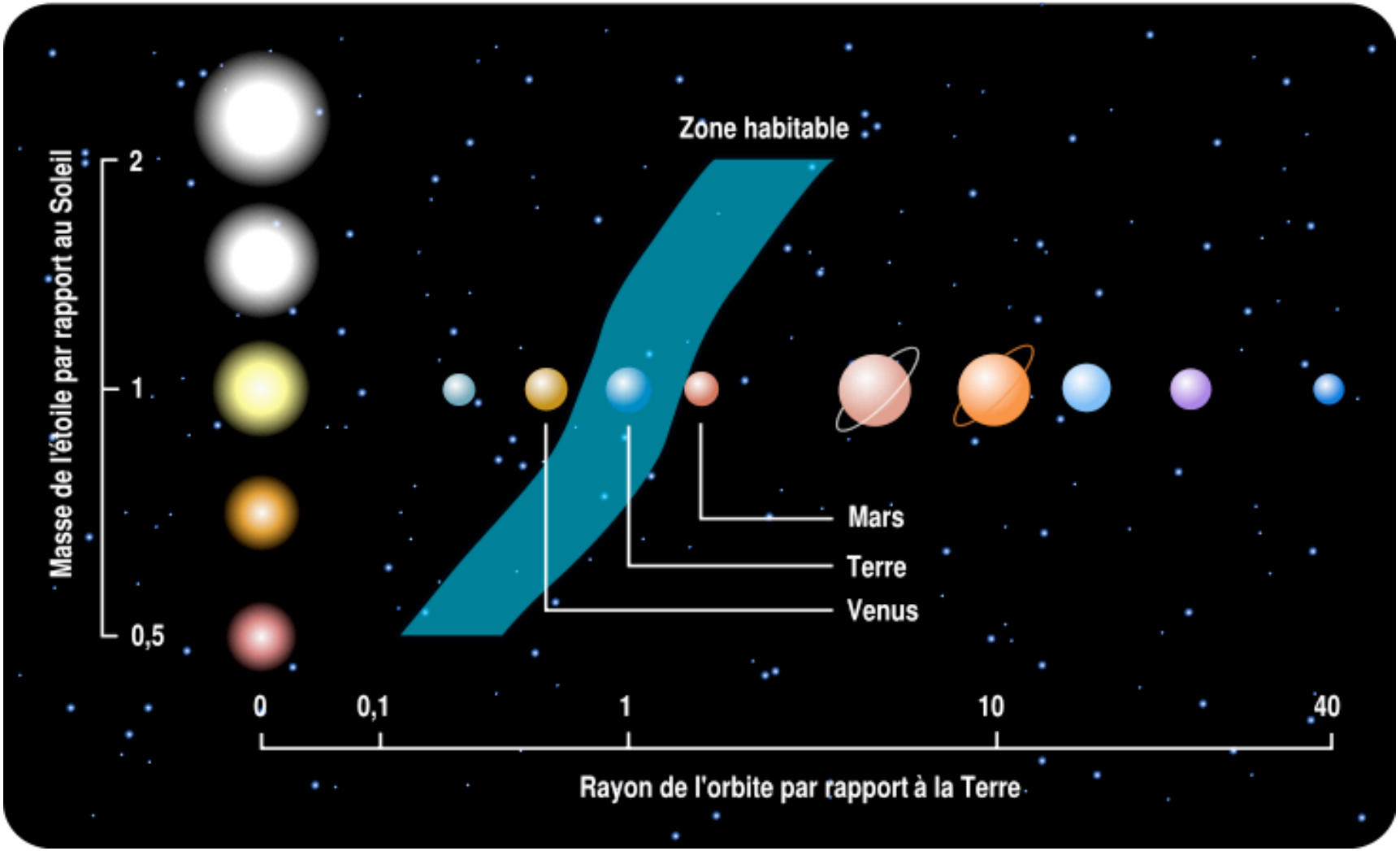


Signatures spectrales

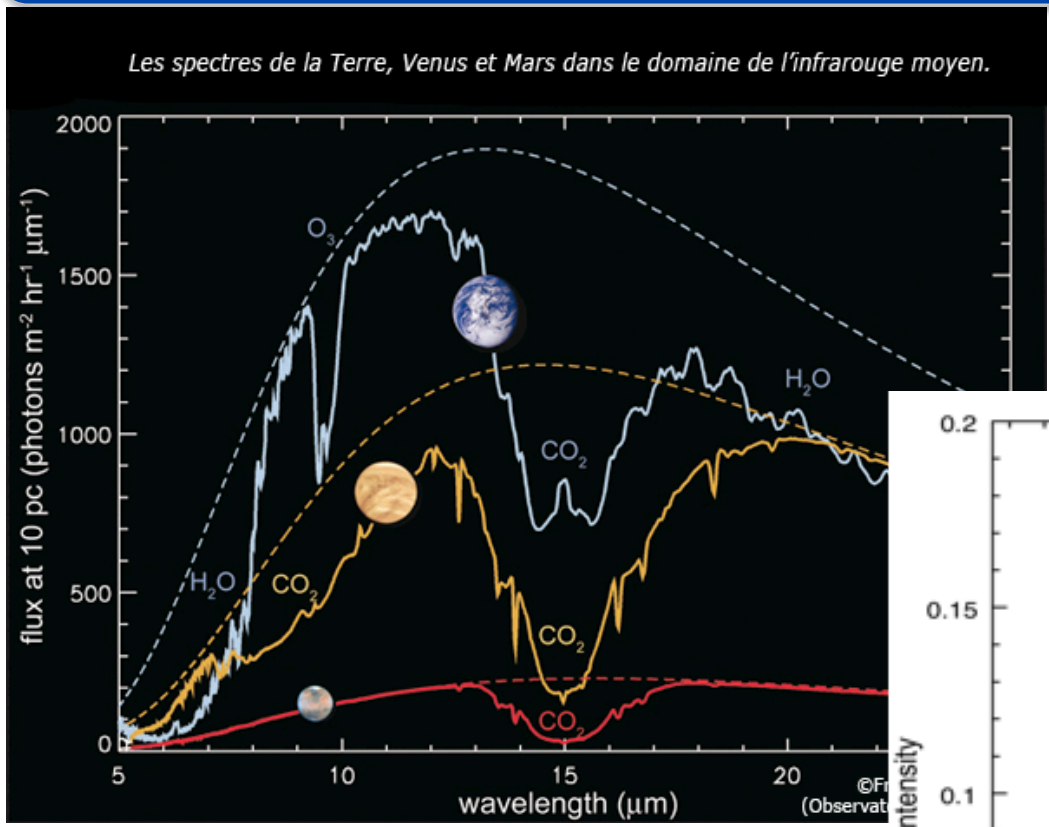


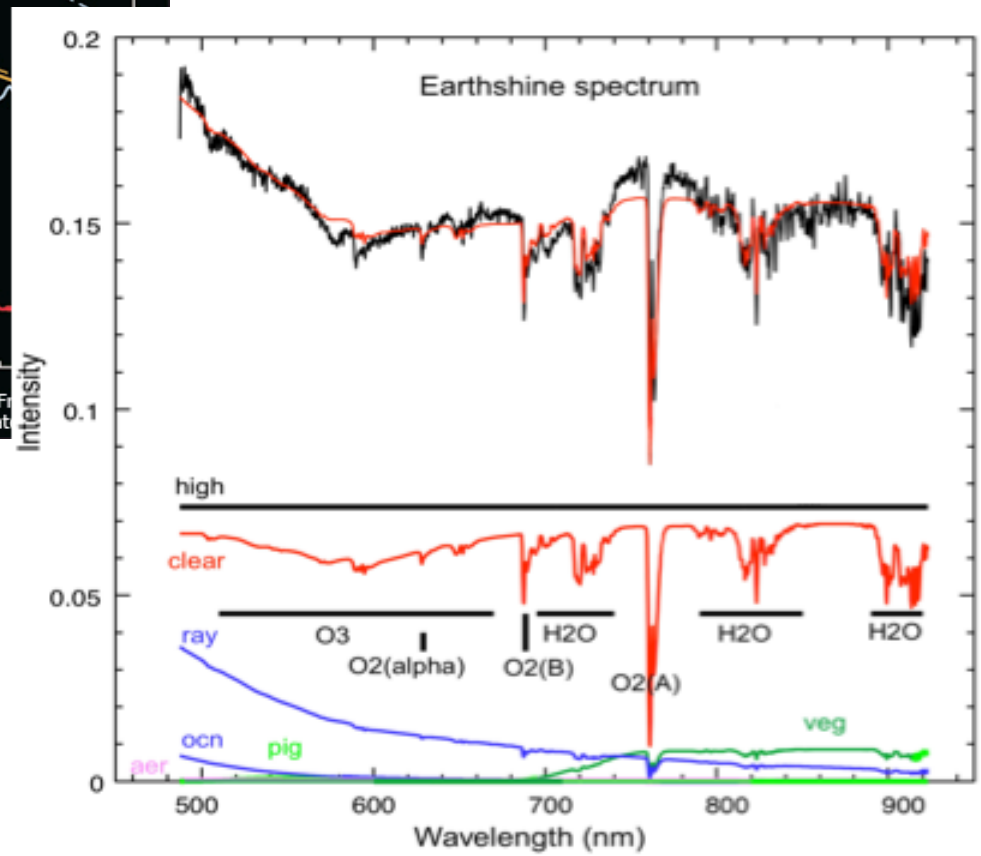


Habitabilité

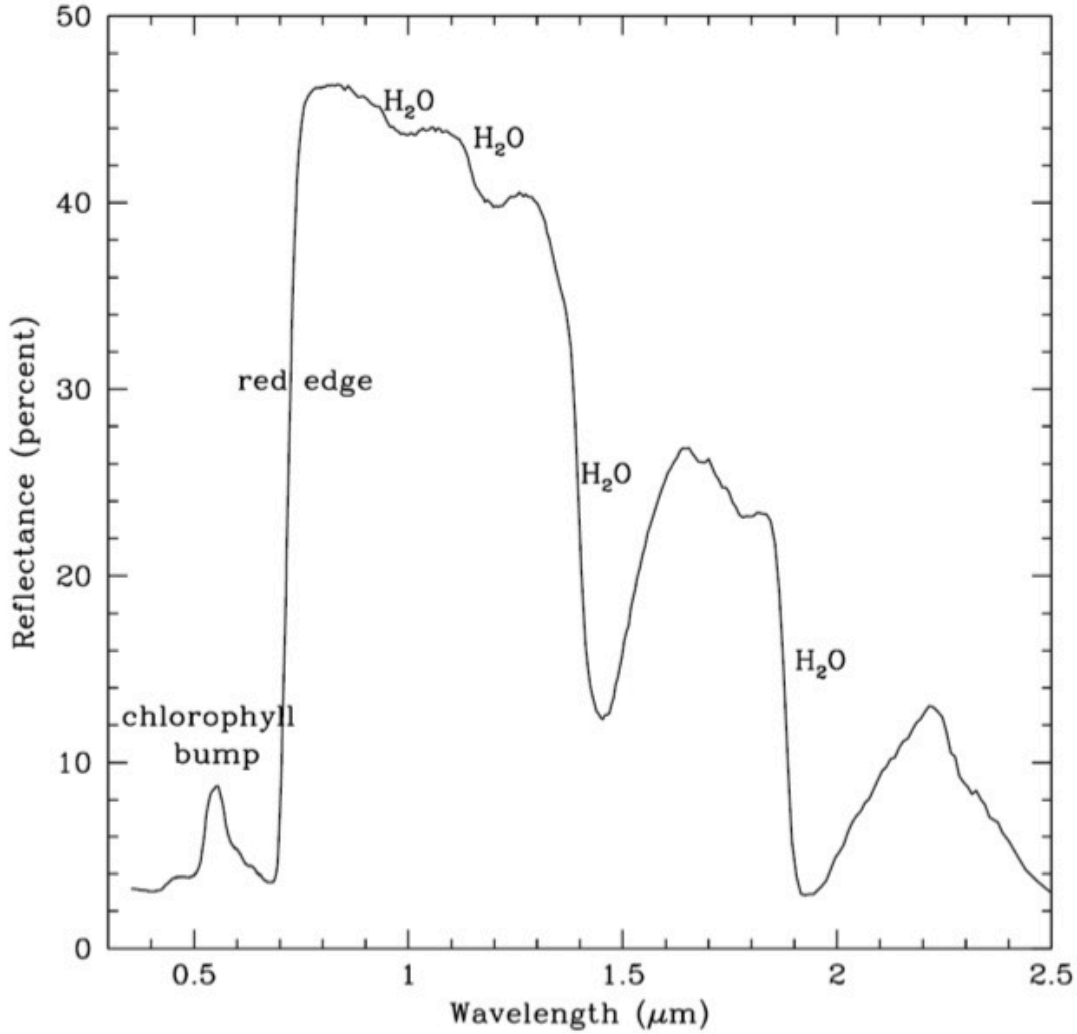


Bio-signatures

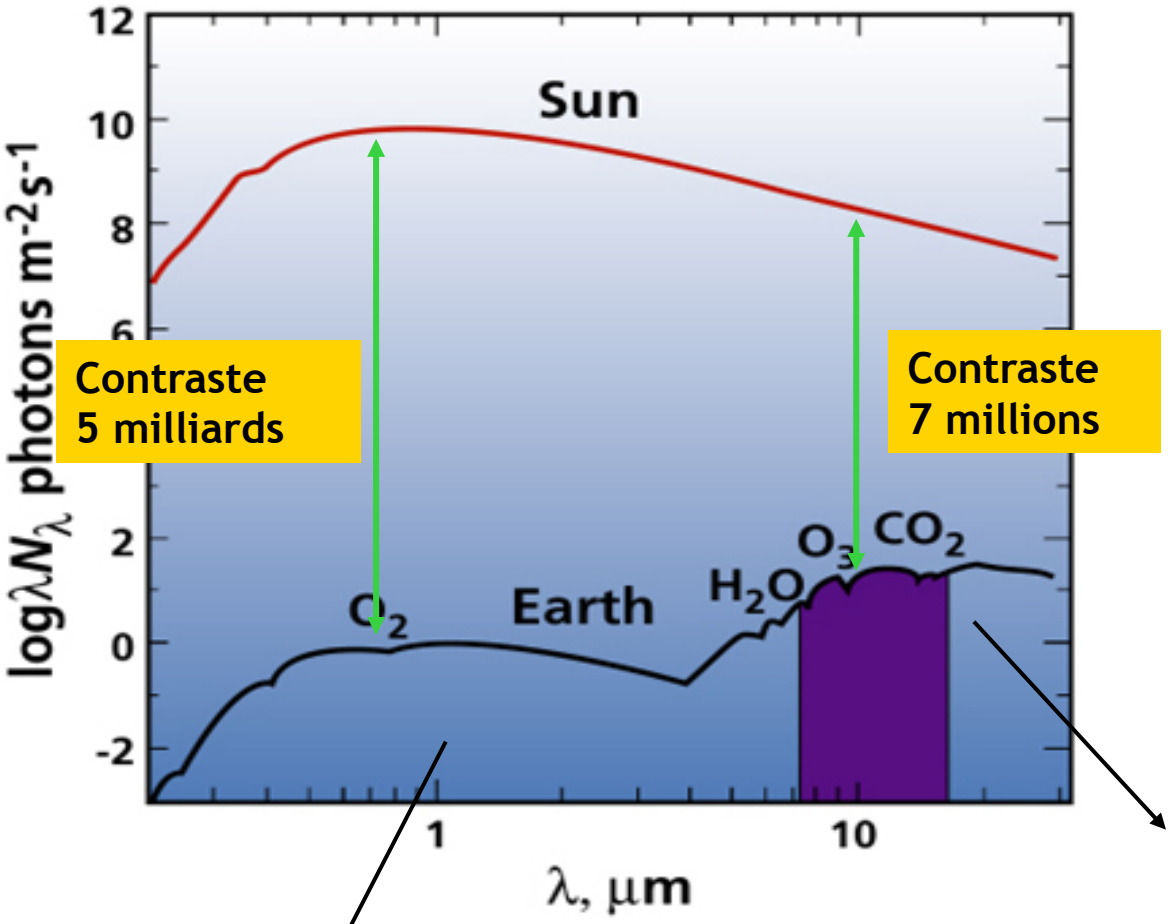




Vegetation: red edge



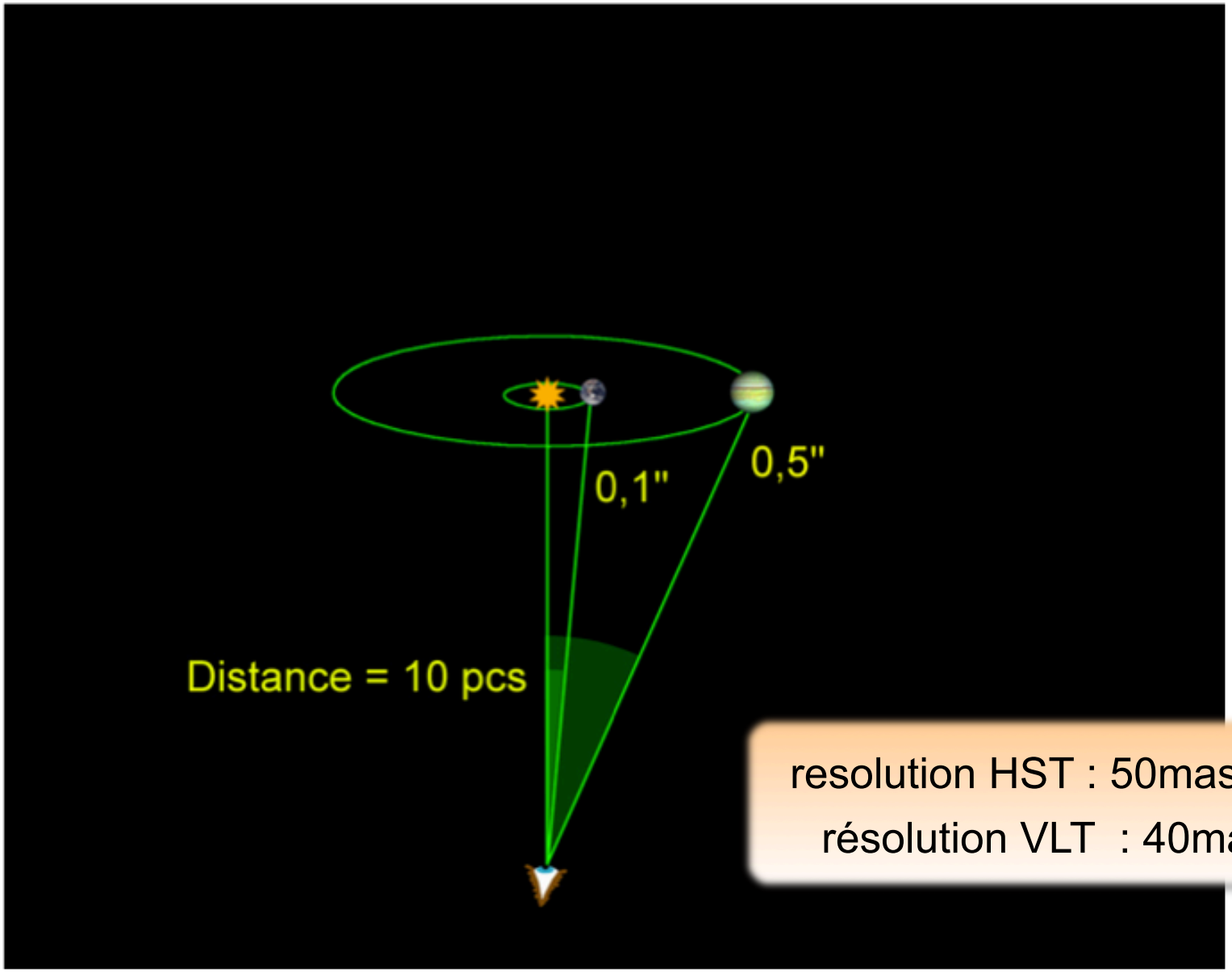
Contraste



Émission thermique
self luminous planets

Lumière réfléchie
irradiated planets

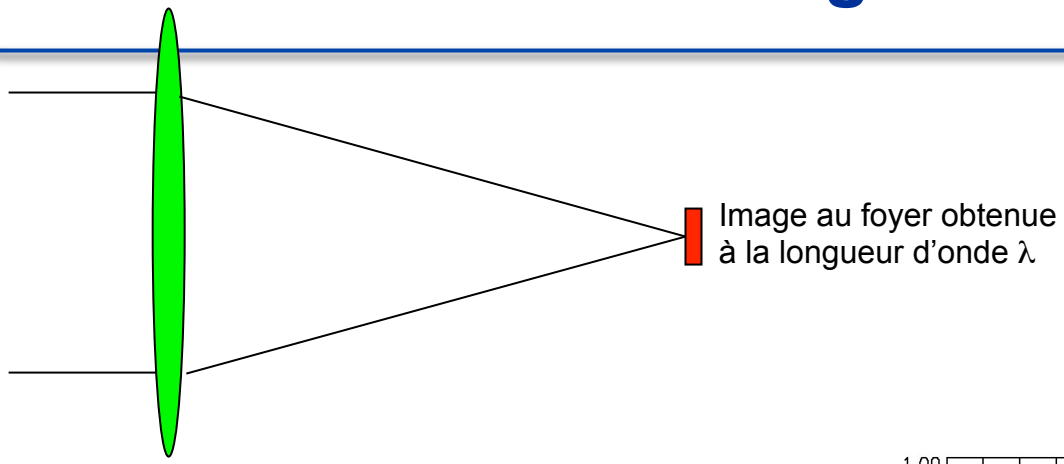
Séparation angulaire



resolution HST : 50mas (visible)

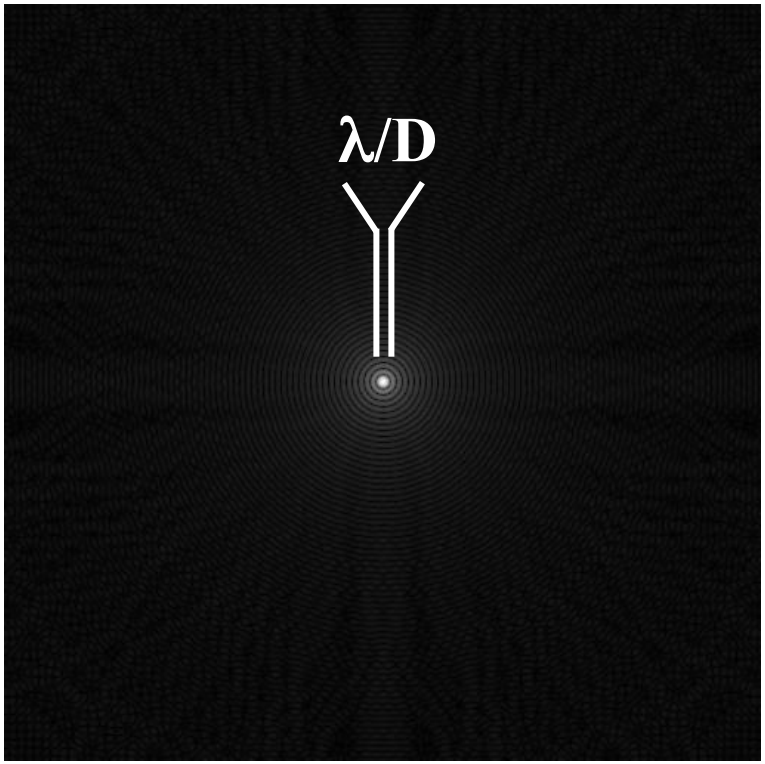
résolution VLT : 40mas (IR)

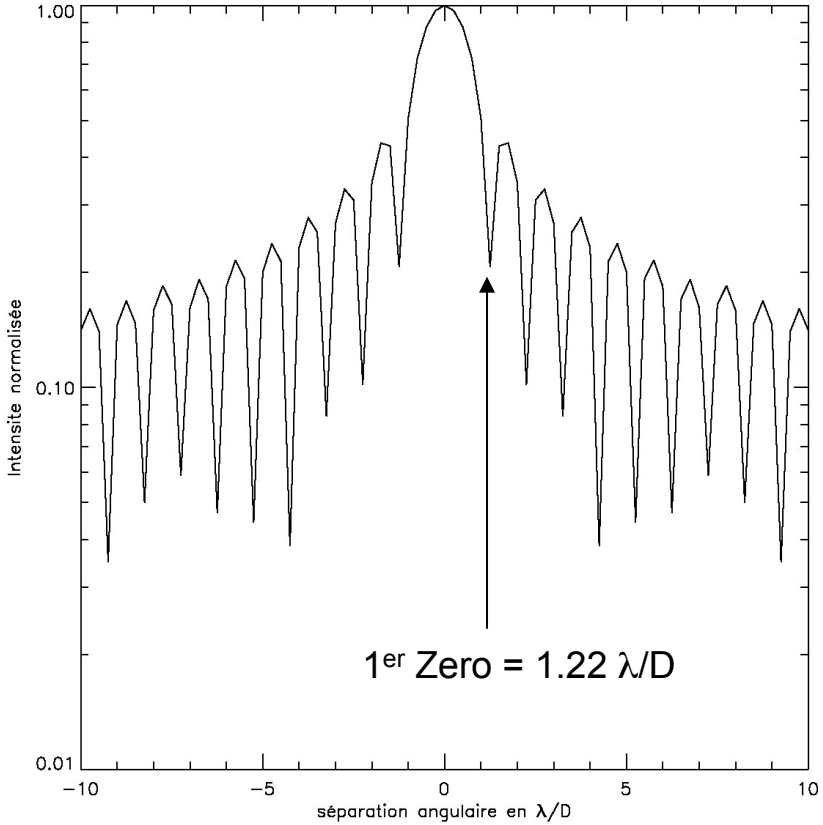
Résolution angulaire



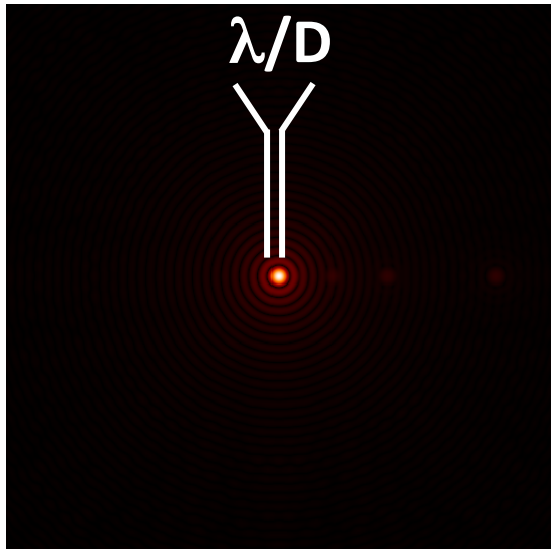
L'image est une tâche d'Airy (PSF)
de taille caractéristique λ/D

L'image est la Transformée de Fourier
de la pupille du télescope en module carré



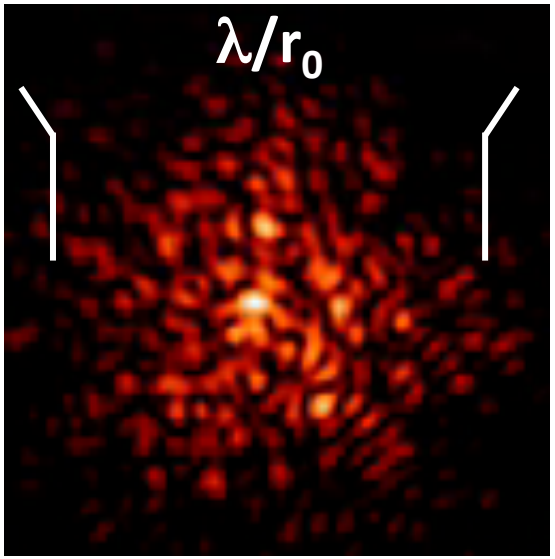


Défauts optiques

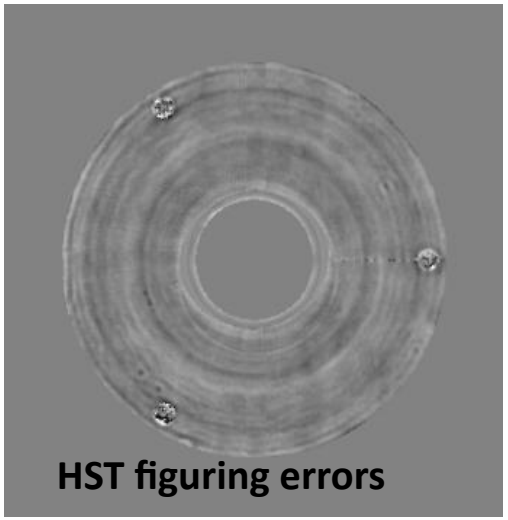


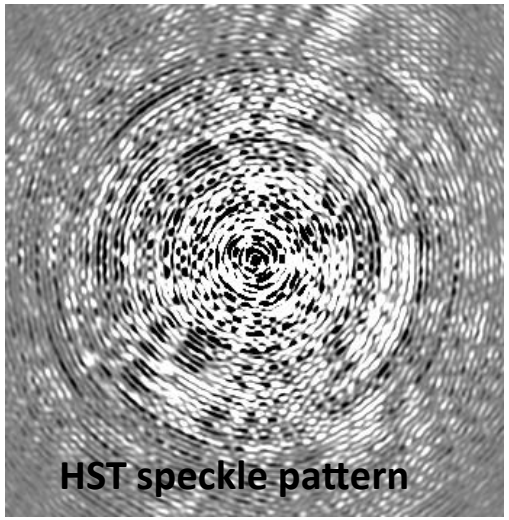
Sol

un point source devient =>



Espace





Pourquoi construire des télescopes grands et chers ?

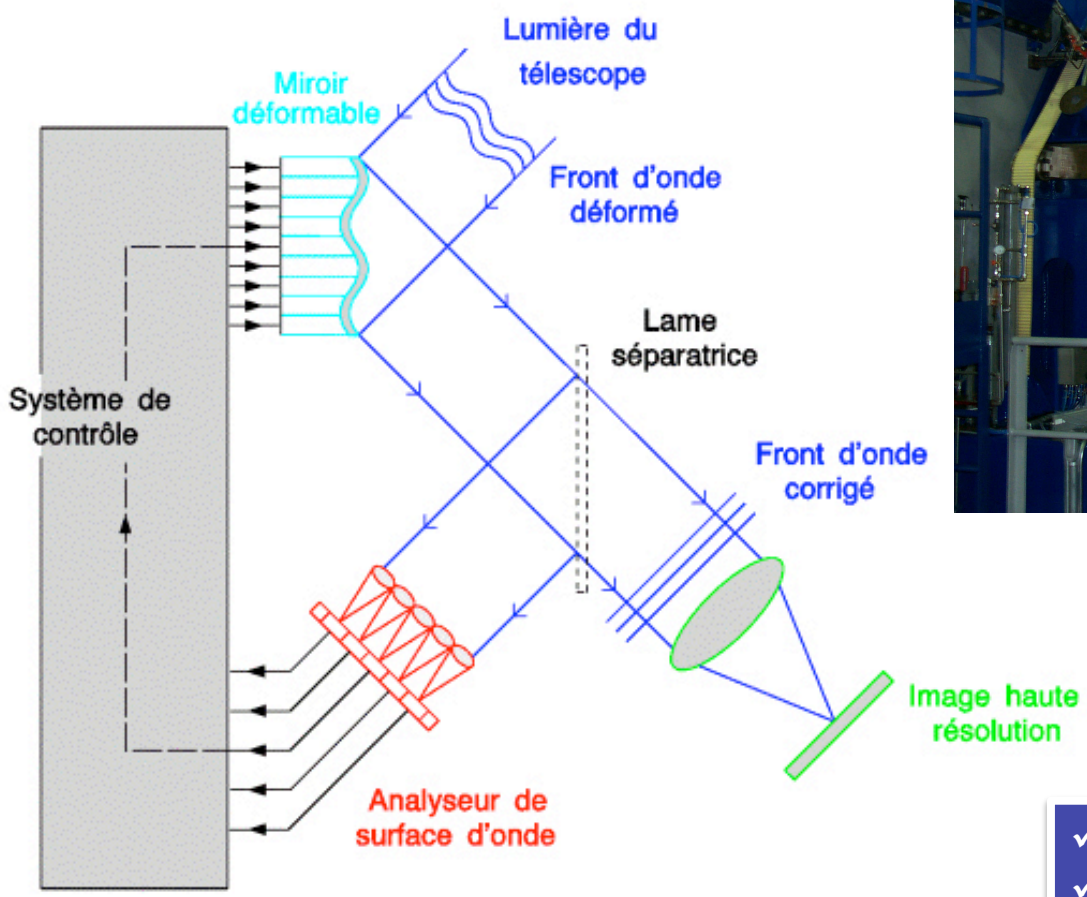
Sont ils juste des entonnoirs à photons ?

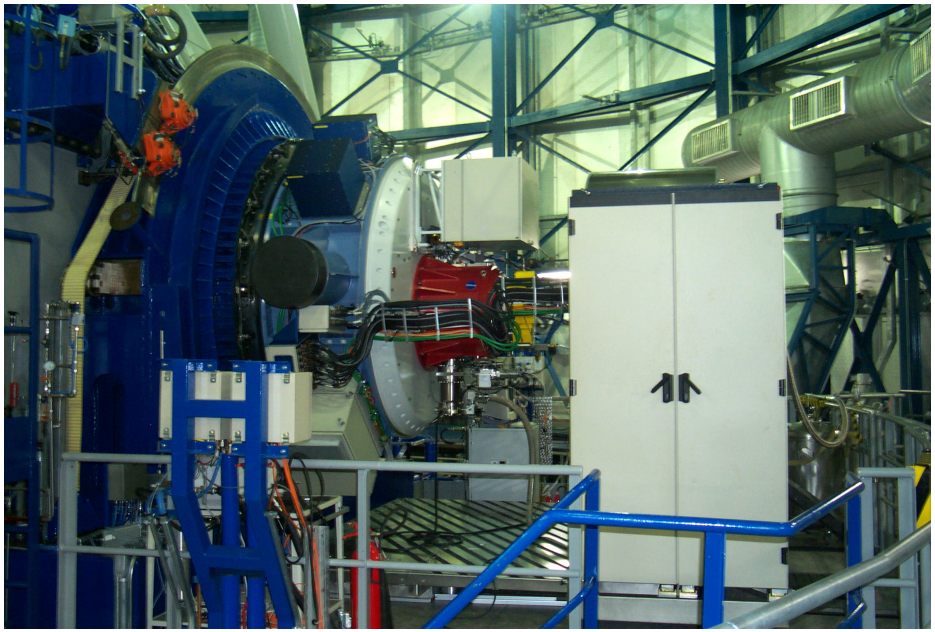
NON !!!

On peut restaurer la résolution angulaire théorique grâce à des techniques intelligentes

=> Optique Adaptative

Optique Adaptative

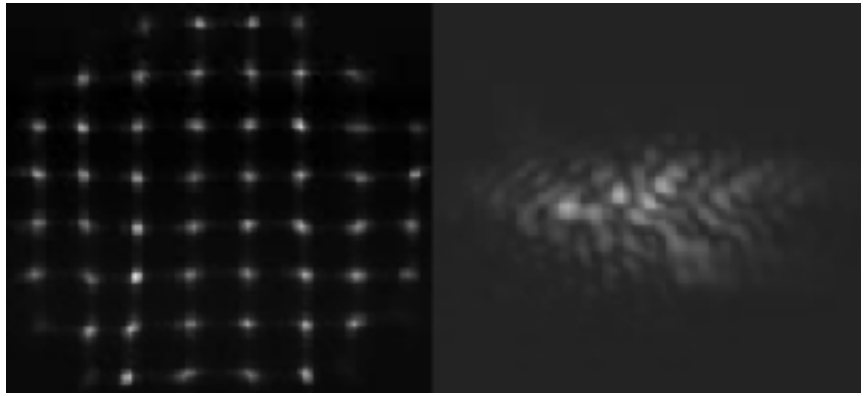




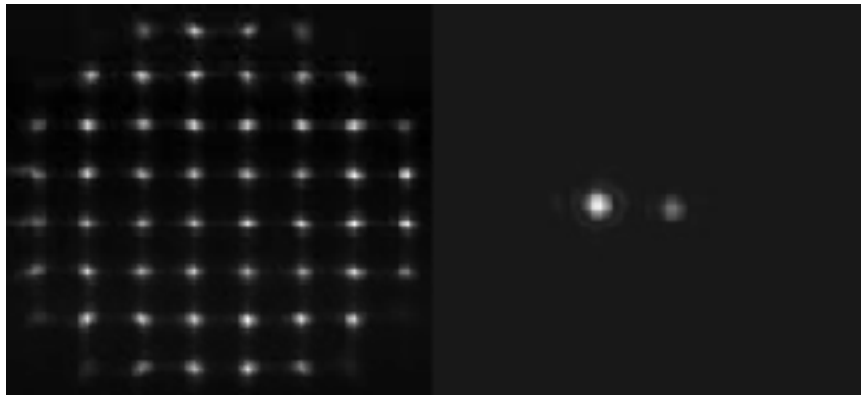
Optique adaptative NAOS au VLT

- ✓ Restaure la résolution angulaire théorique
- ✓ Concentre le flux dans un pic de diffraction

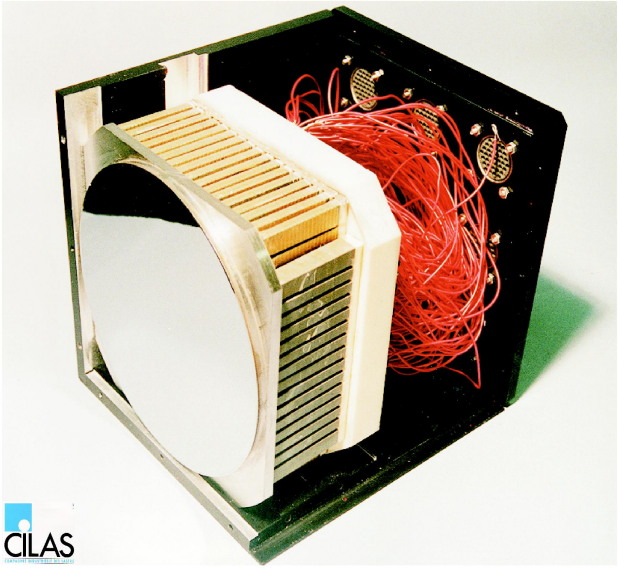
Optique Adaptative



Boucle ouverte

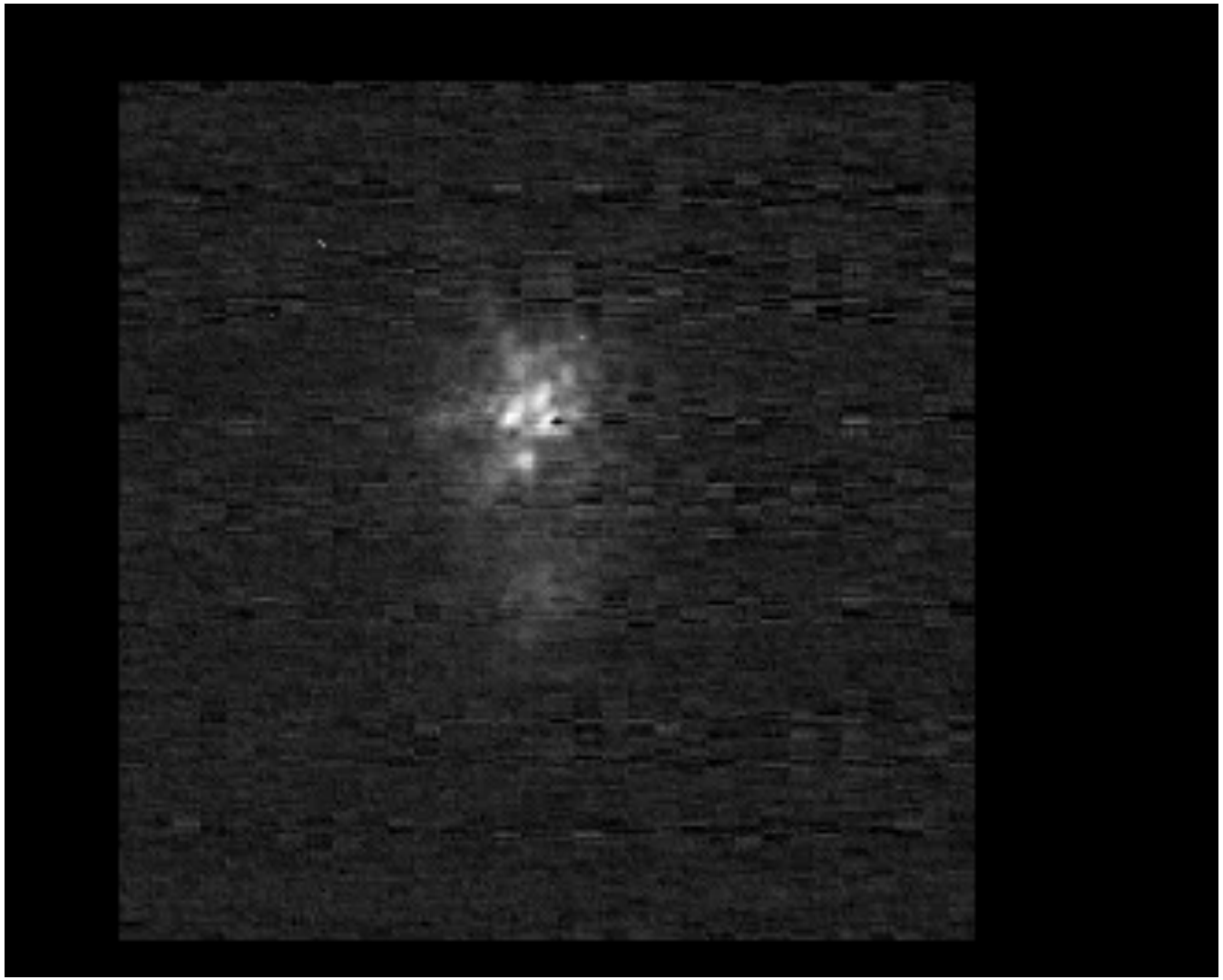


Boucle fermée



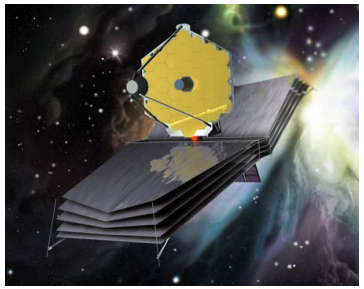
Miroir déformable

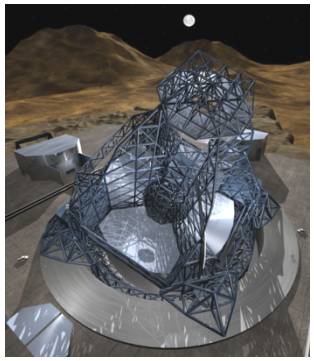
Optique Adaptative



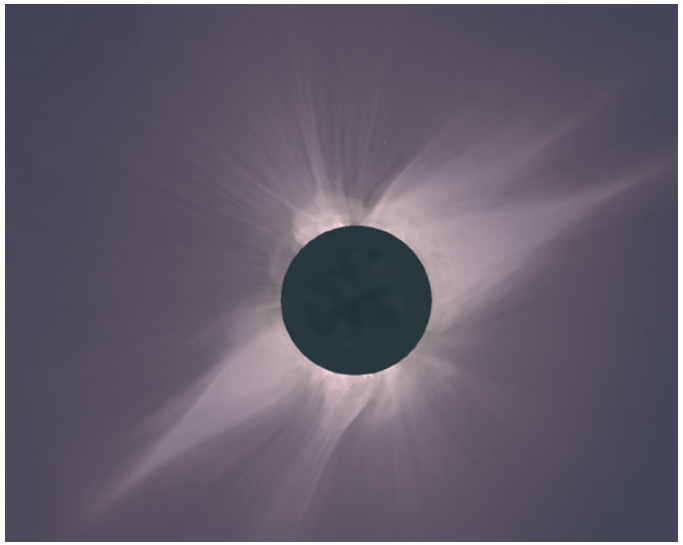
Solutions

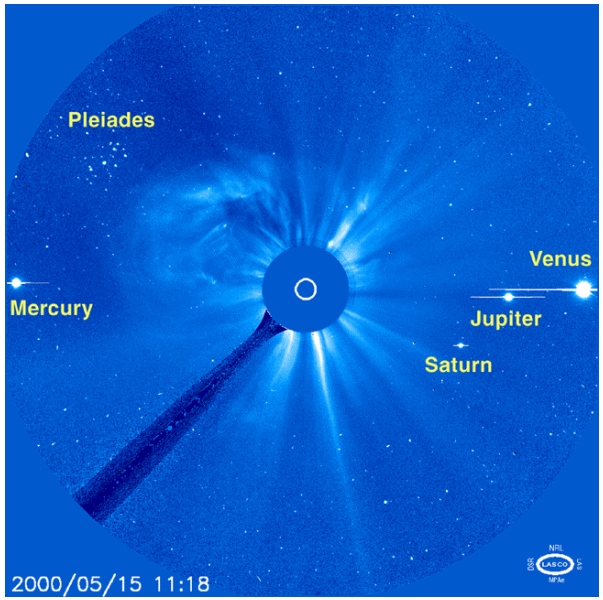
Il faut des grands telescopes …





Il faut atténuer l'étoile



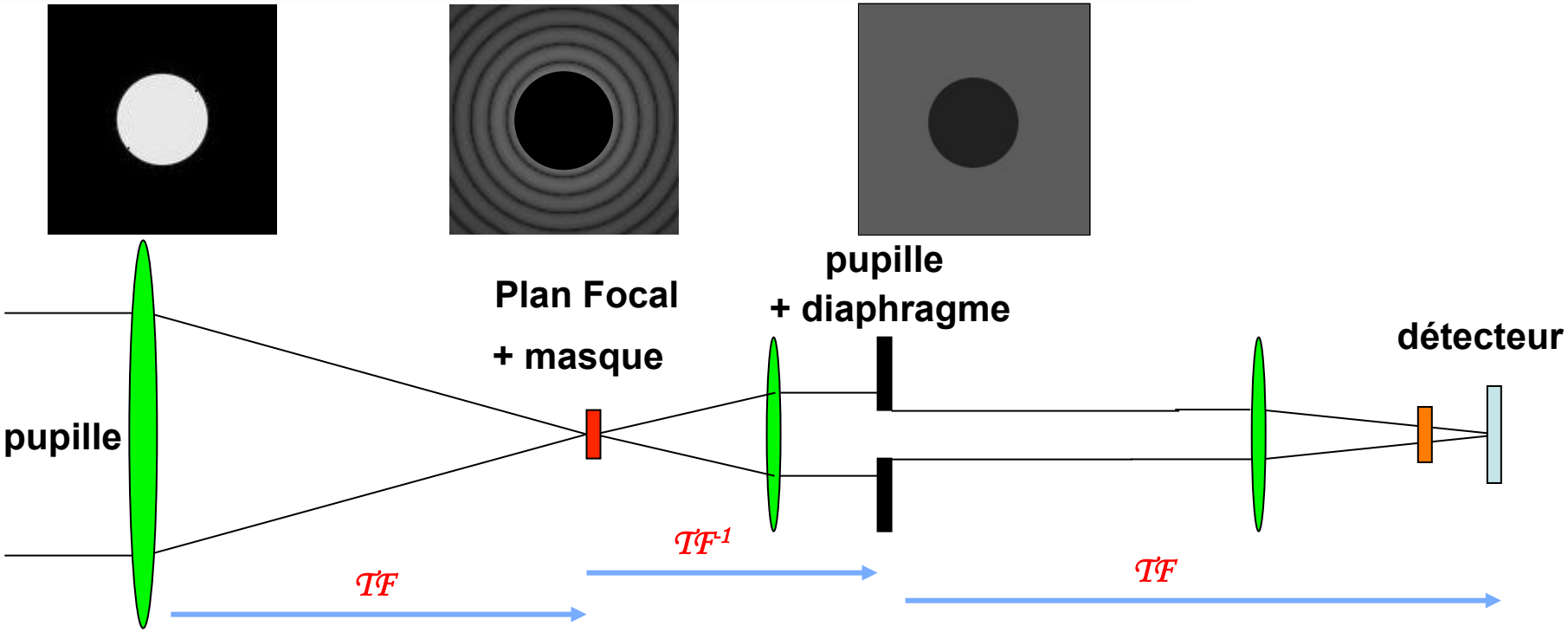


Oui mais … le Soleil est une source étendue

Les étoiles sont des points sources => diffraction plus forte

Il faut des coronagraphes stellaires adaptés

Coronographie



Plan A ψ_A

Plan B ψ_B

Plan C ψ_C

Plan D ψ_D

Formalisme

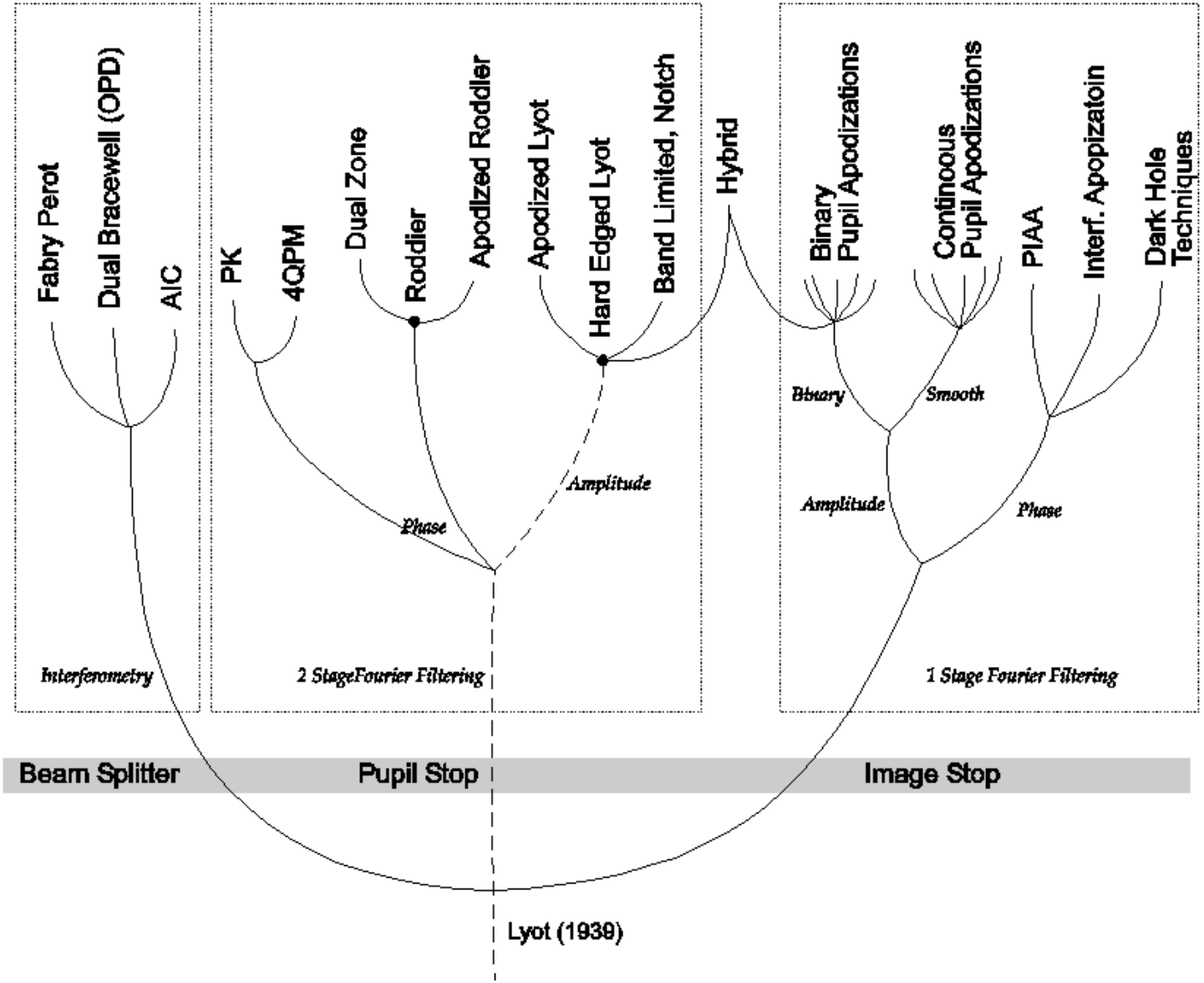
Plan A: $\psi_A = A e^{i\varphi}$ $\quad \psi_A = A$ si $\varphi = 0$

Plan B: $\psi_B = \overline{\psi_A} \Rightarrow \overline{\psi_A}.M$

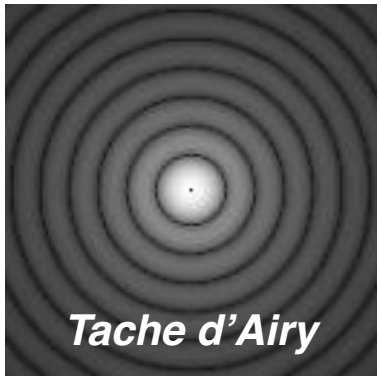
Plan C: $\psi_C = \overline{\psi_B} = \psi_A \otimes \overline{M} \Rightarrow \boxed{\left(\psi_A \otimes \overline{M}\right)}.D$

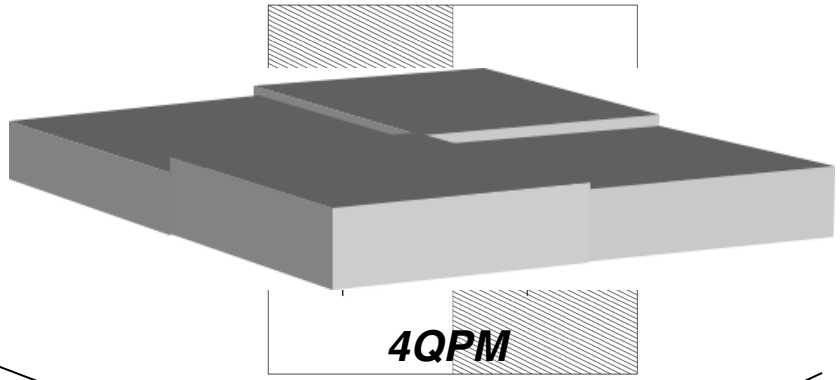
Plan D: $\psi_D = \overline{\psi_C} = \left(\overline{\psi_A}.M\right) \otimes \overline{D}$

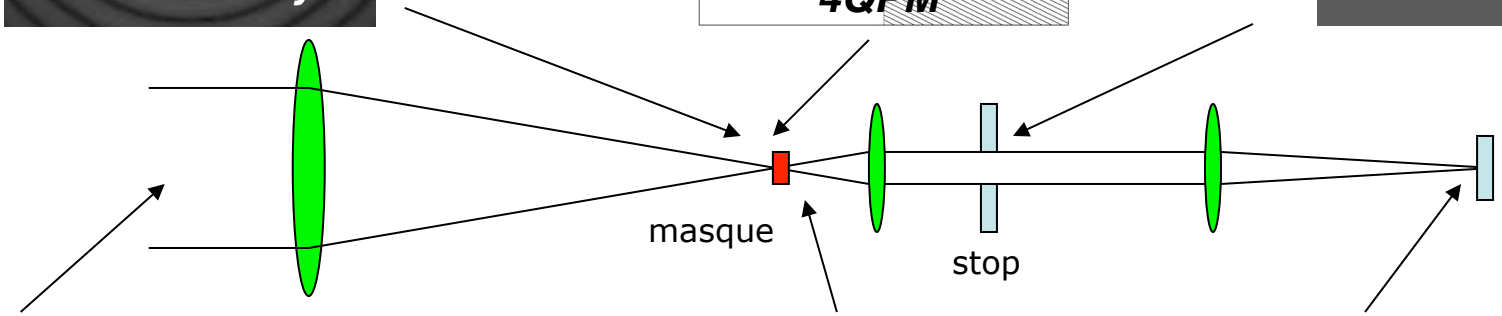
Zoologie

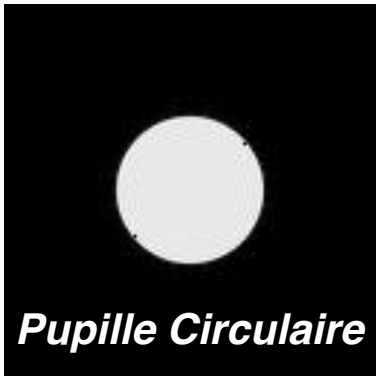

Fabry Perot
Dual Bracewell (OPD)
AIC
PK
4QPM
Dual Zone
Roddier
Apodized Roddier
Apodized Lyot
Hard Edged Lyot
Band Limited, Notch
Hybrid
Binary Pupil Apodizations
Continous Pupil Apodizations
PIAA
Interf. Apopizatoin
Dark Hole Techniques
Binary
Smooth
Amplitude
Phase
Amplitude
Phase
Interferometry
2 StageFourier Filtering
1 Stage Fourier Filtering
Beam Splitter
Pupil Stop
Image Stop
Lyot (1939)

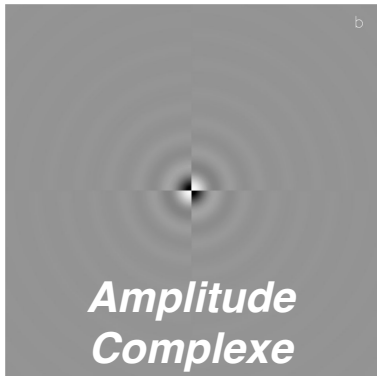
Un exemple: masque de phase à 4 quadrants



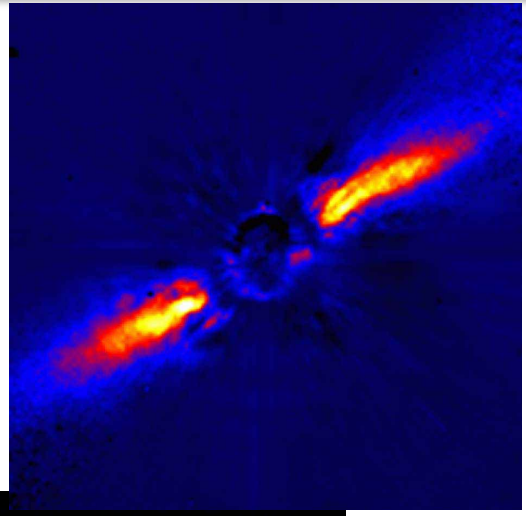


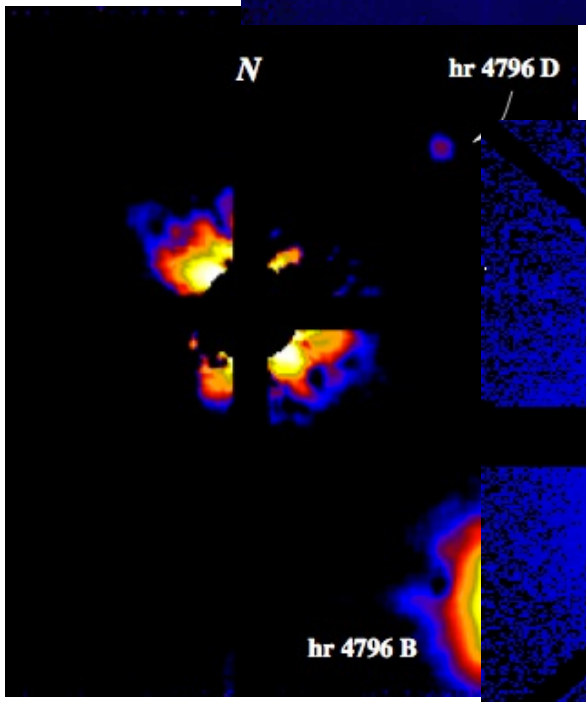


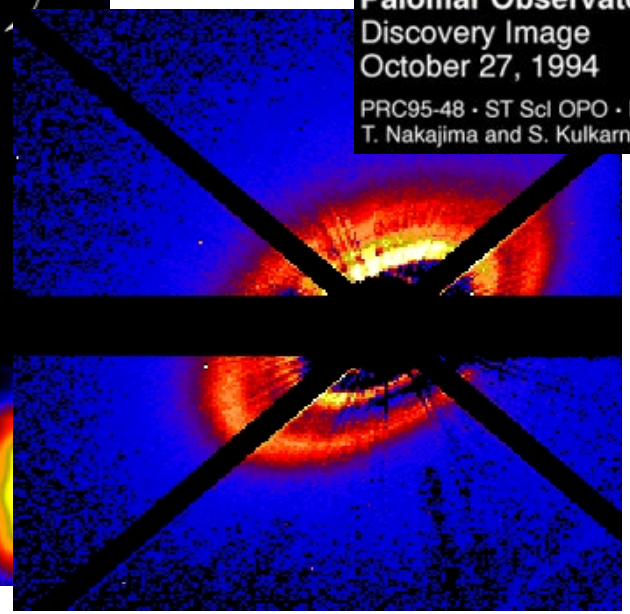


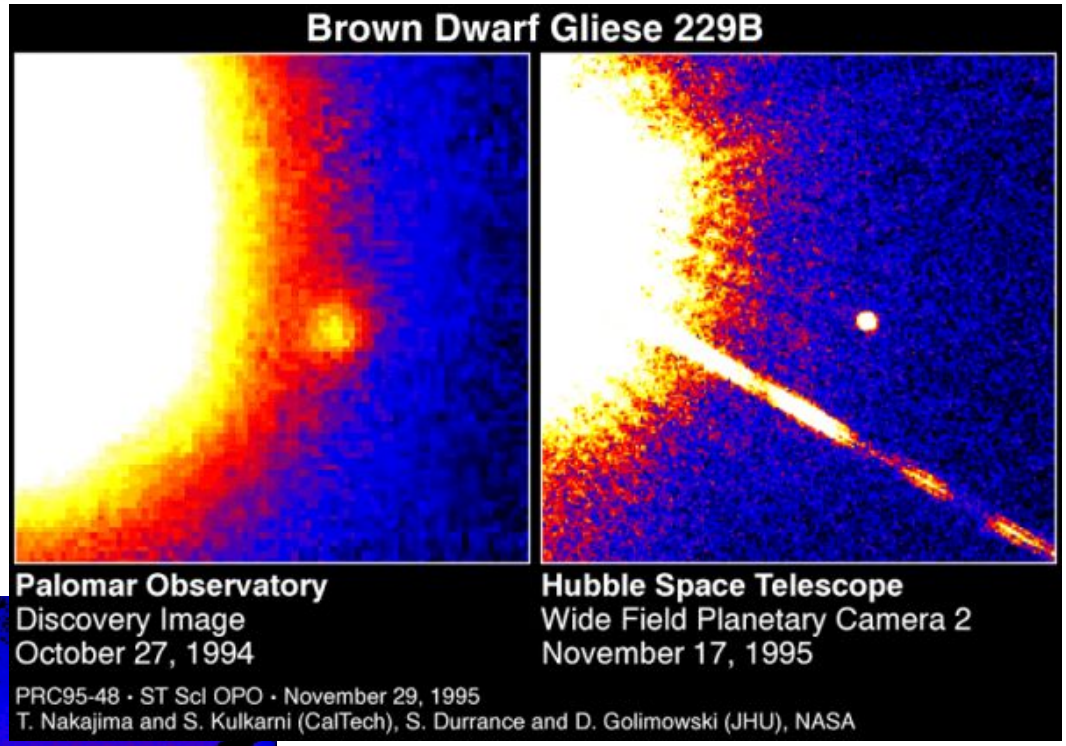


Les années 1990/2000



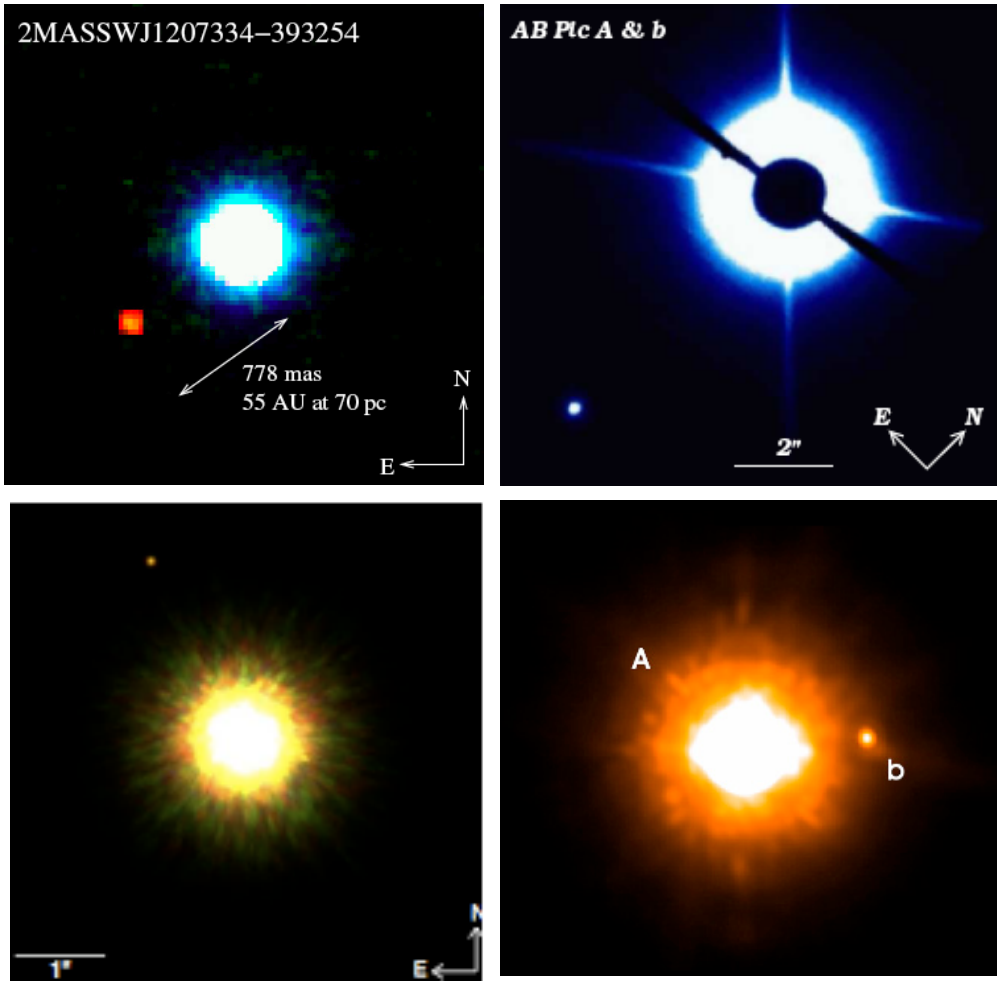






Disques et naines brunes …

Premiers résultats



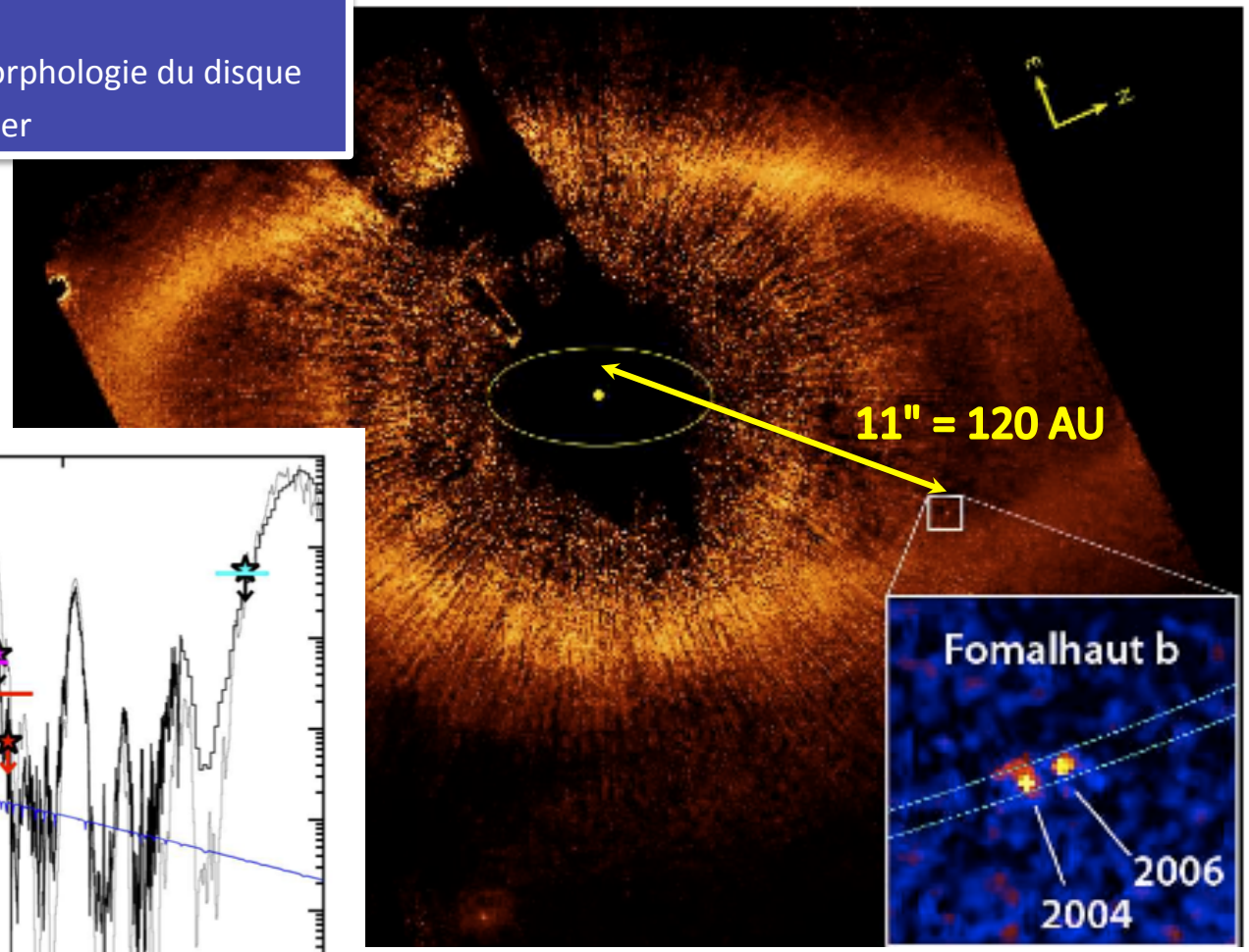
2M1207	5 M_J	46 AU
GQ Lup	17 M_J	100 AU
AB Pic	14 M_J	248 AU
CHRX73	12 M_J	210 AU
HN Peg	16 M_J	795 AU
DH Tau	12 M_J	330 AU
RSX 1609	8 M_J	330 AU

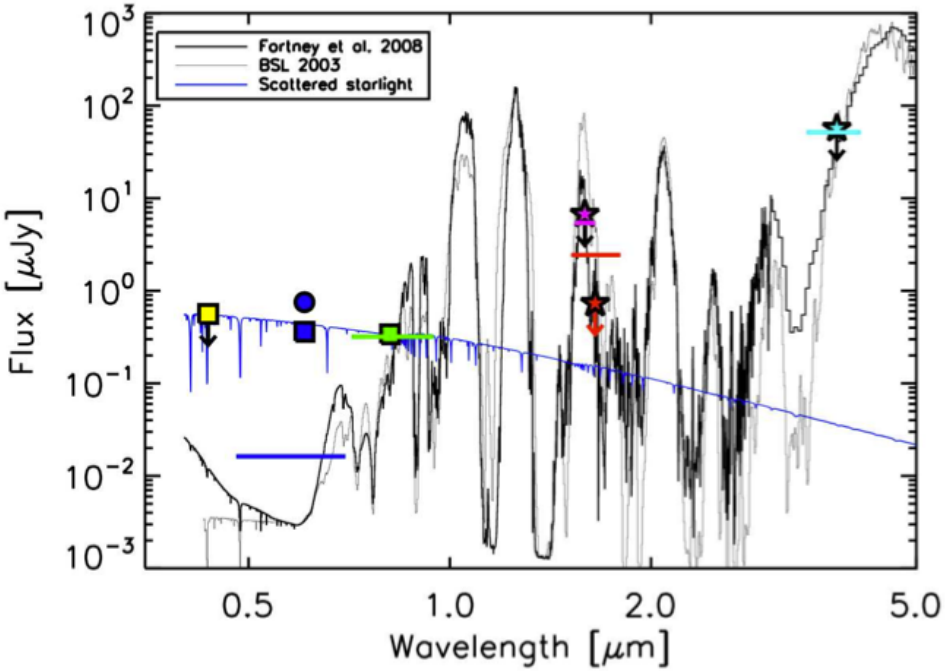
Conditions favorables:

- petits rapports de masse (contraste est petit)
- ages jeunes (planètes plus brillantes)
- séparations physique/angulaire grande

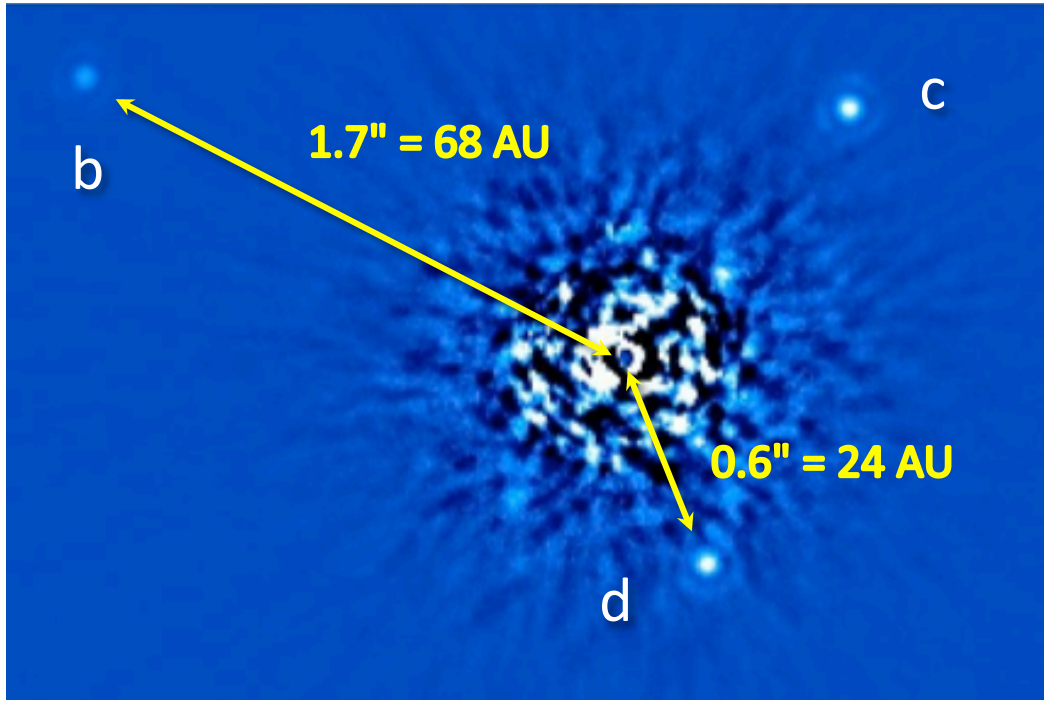
Fomalhaut b

- HST/STIS : 2004, 2006 en visible
- Planète suspectée à partir de la morphologie du disque
- masse limite supérieure = 3 MJupiter

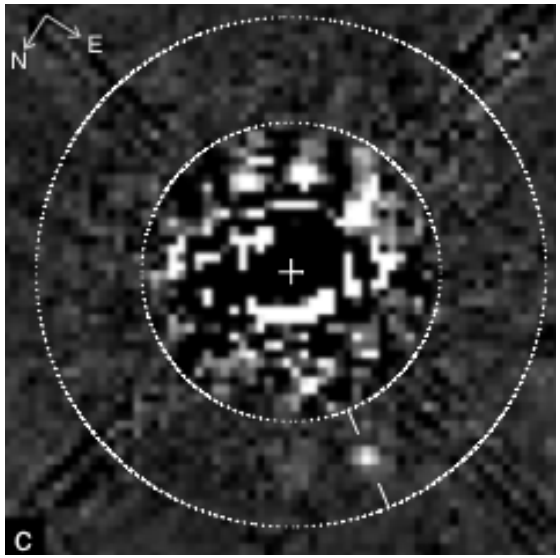




HR8799 bcd



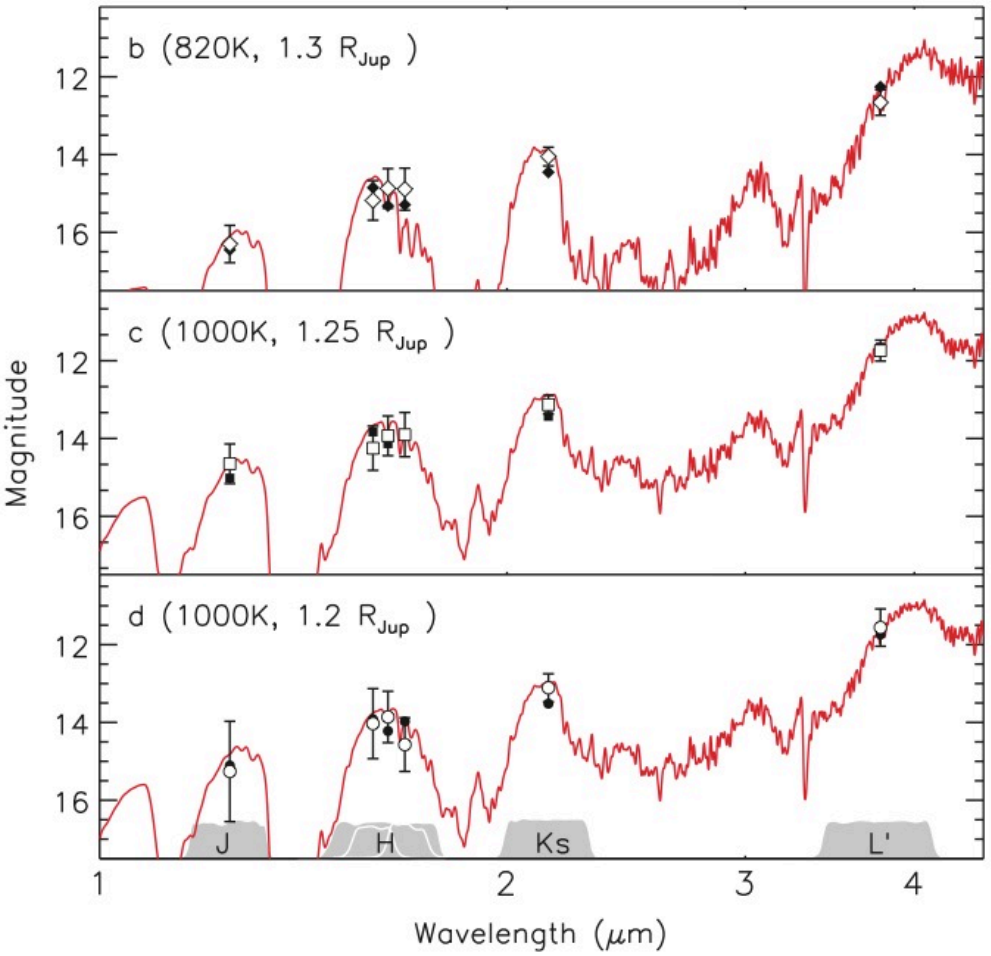
Re-découverte dans données HST/NICMOS de 1998

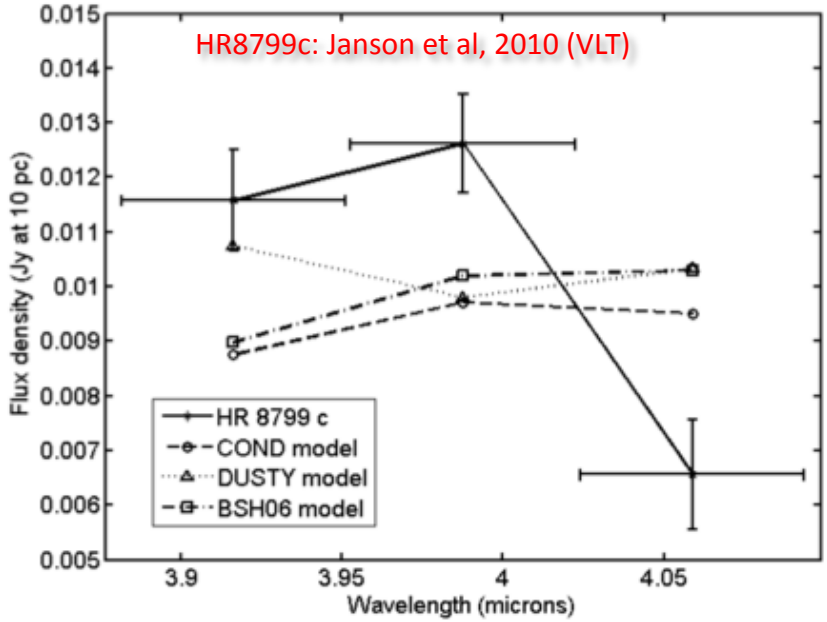


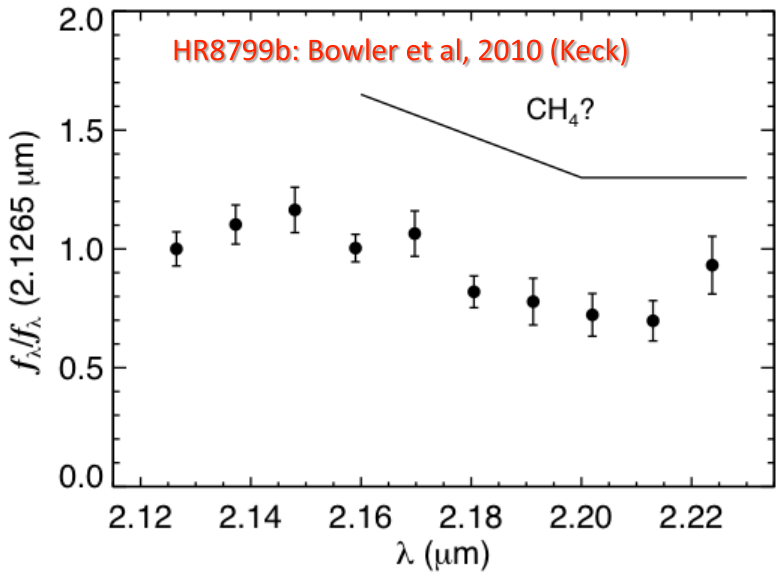
Lafreniere et al, 2009

- 2-periodes d'observations montre le mouvement orbital
- 24, 38, 68 AU
- ~ 30 Myr (20 – 150) -- > masses planétaires
- 7, 10, 10 $M_{Jupiter}$

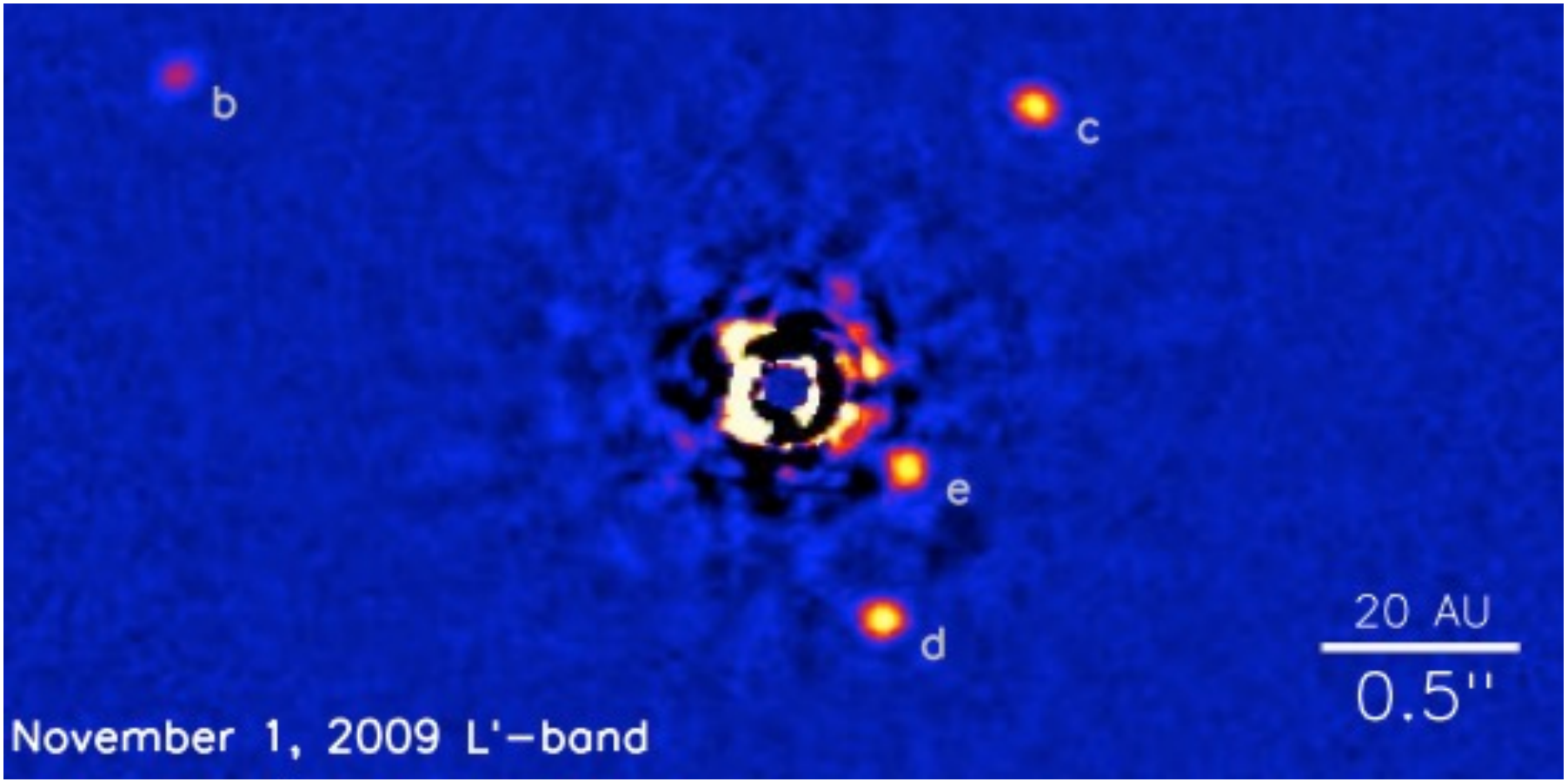
HR8799 bcd


b (820K, 1.3 R_Jup)
c (1000K, 1.25 R_Jup)
d (1000K, 1.2 R_Jup)
Magnitude
12
14
16
J
H
Ks
L'
1
2
3
4
Wavelength (μm)

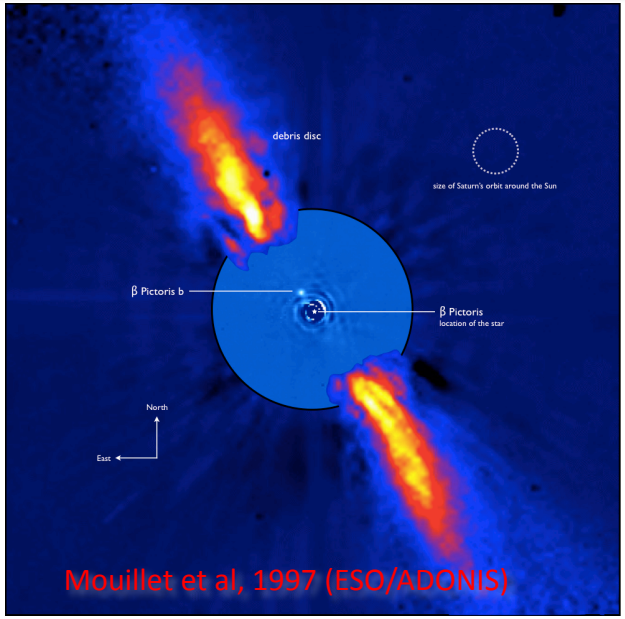

HR8799c: Janson et al, 2010 (VLT)
Flux density (Jy at 10 pc)
0.015
0.014
0.013
0.012
0.011
0.01
0.009
0.008
0.007
0.006
0.005
HR 8799 c
COND model
DUSTY model
BSH06 model
3.9
3.95
4
4.05
Wavelength (microns)


HR8799b: Bowler et al, 2010 (Keck)
CH4?
fλ/fλ (2.1265 μm)
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
2.12
2.14
2.16
2.18
2.20
2.22
λ (μm)

HR8799 bcde

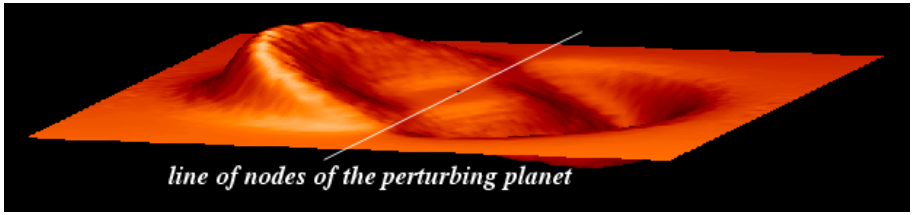


Beta Pictoris b

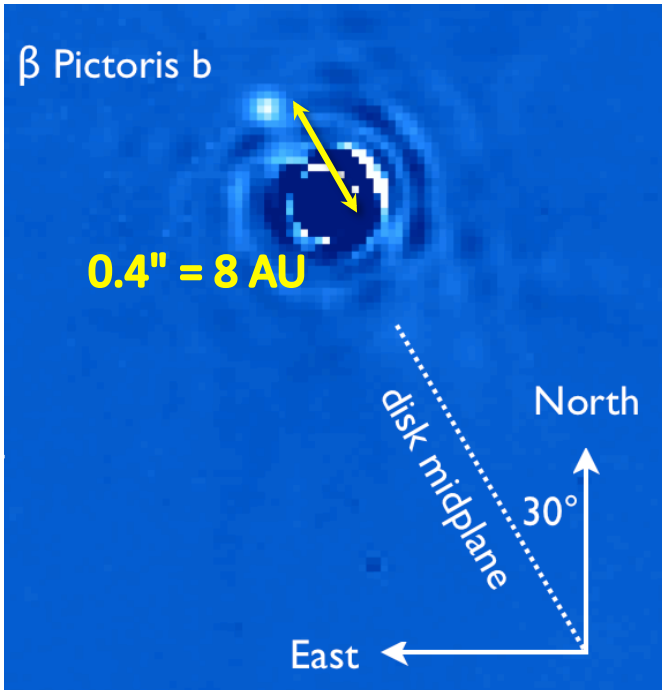


Mouillet et al, 1997 (ESO/ADONIS)

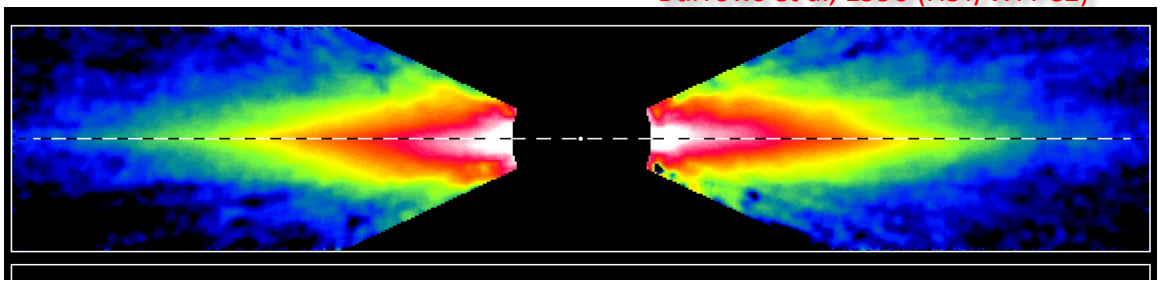
Augereau et al 2001



Lagrange et al, 2009 (NACO)



Burrows et al, 1996 (HST/WFPC2)



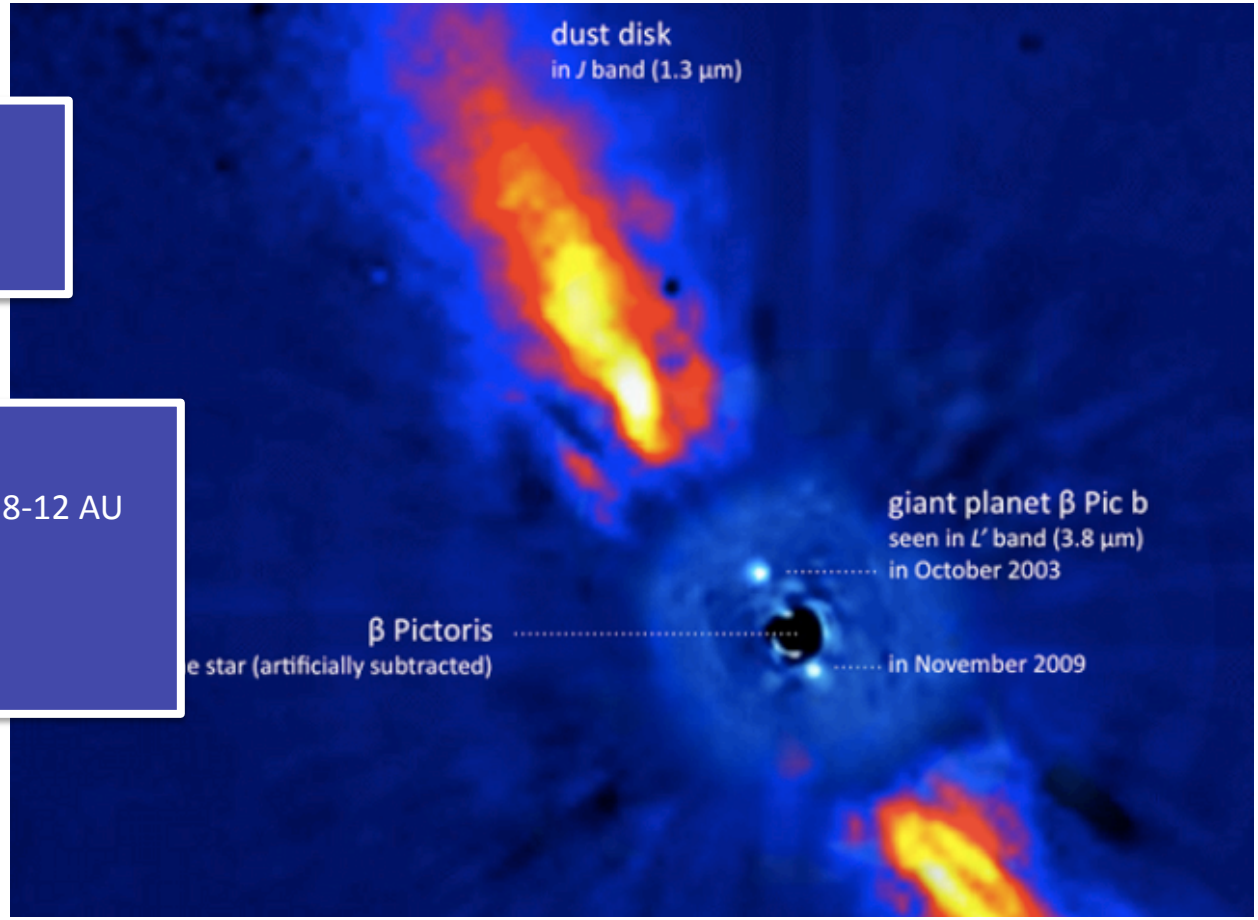
- planète sur orbite inclinée suspectée depuis 1996 pour expliquer le "warp"
- candidat planète détecté en NACO 2003 bande L'

Beta Pictoris b

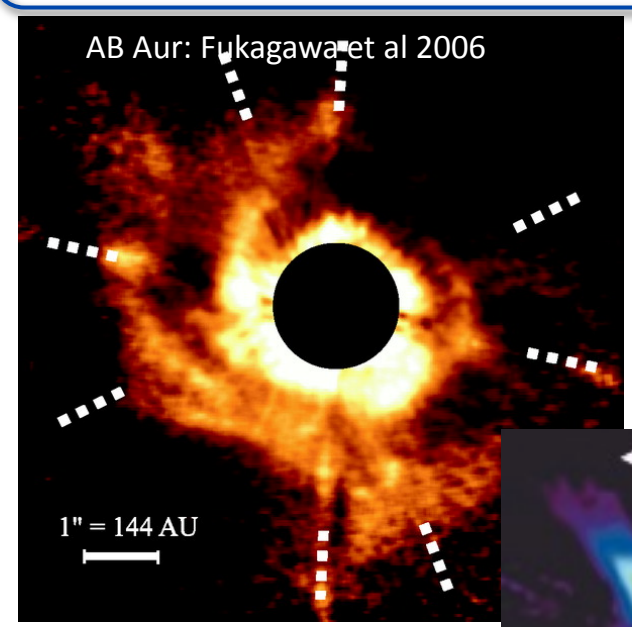
Lagrange et al, 2010 (NACO)

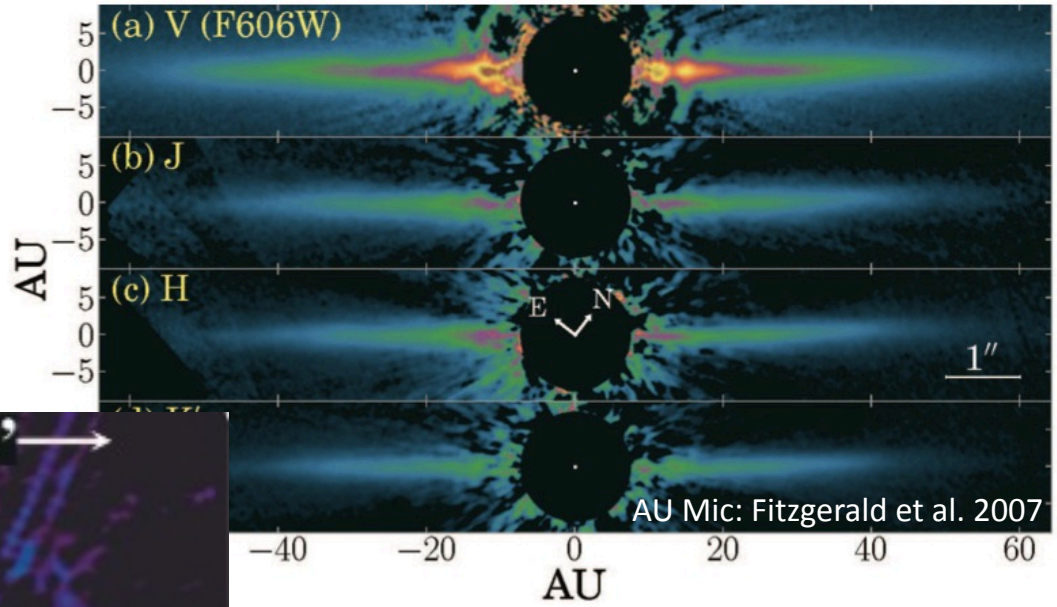
- 2003/10 : 0.4" NE
- 2009/01 : pas détecté
- 2009/11 : 0.3" SW

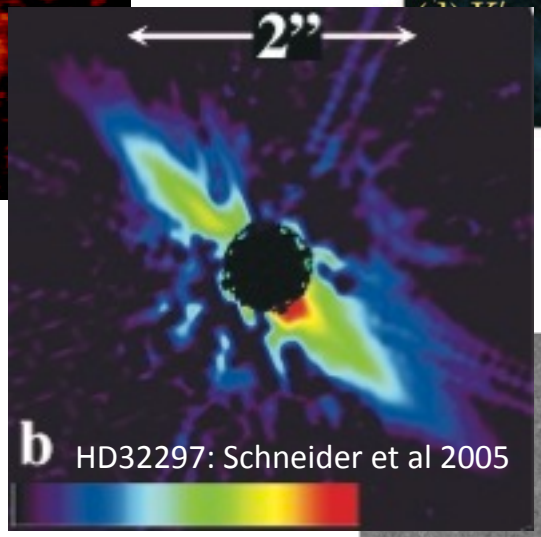
- Planète dans le disque
- petite séparation confirmée : 8-12 AU
- production du warp ?
- formation par accrétion ?
- suivi en cours …

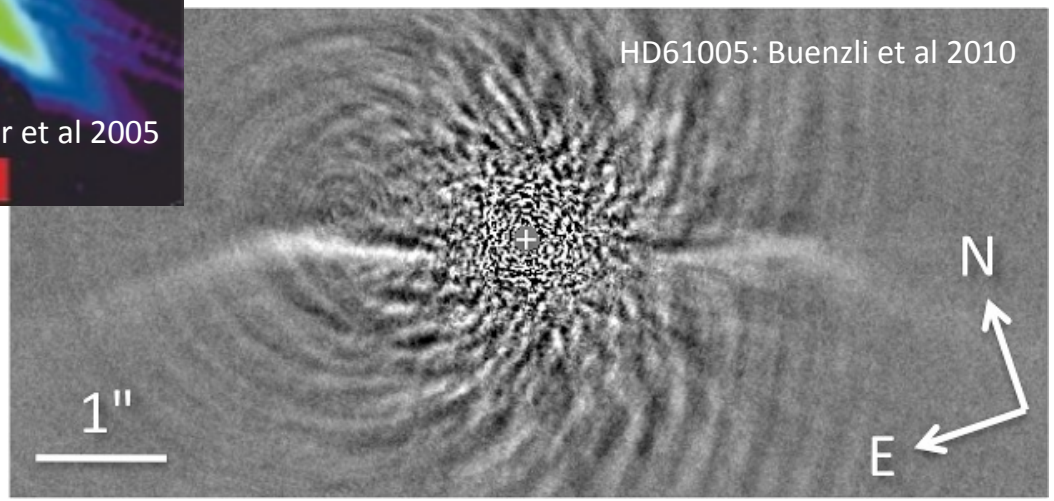


Disques circumstellaires



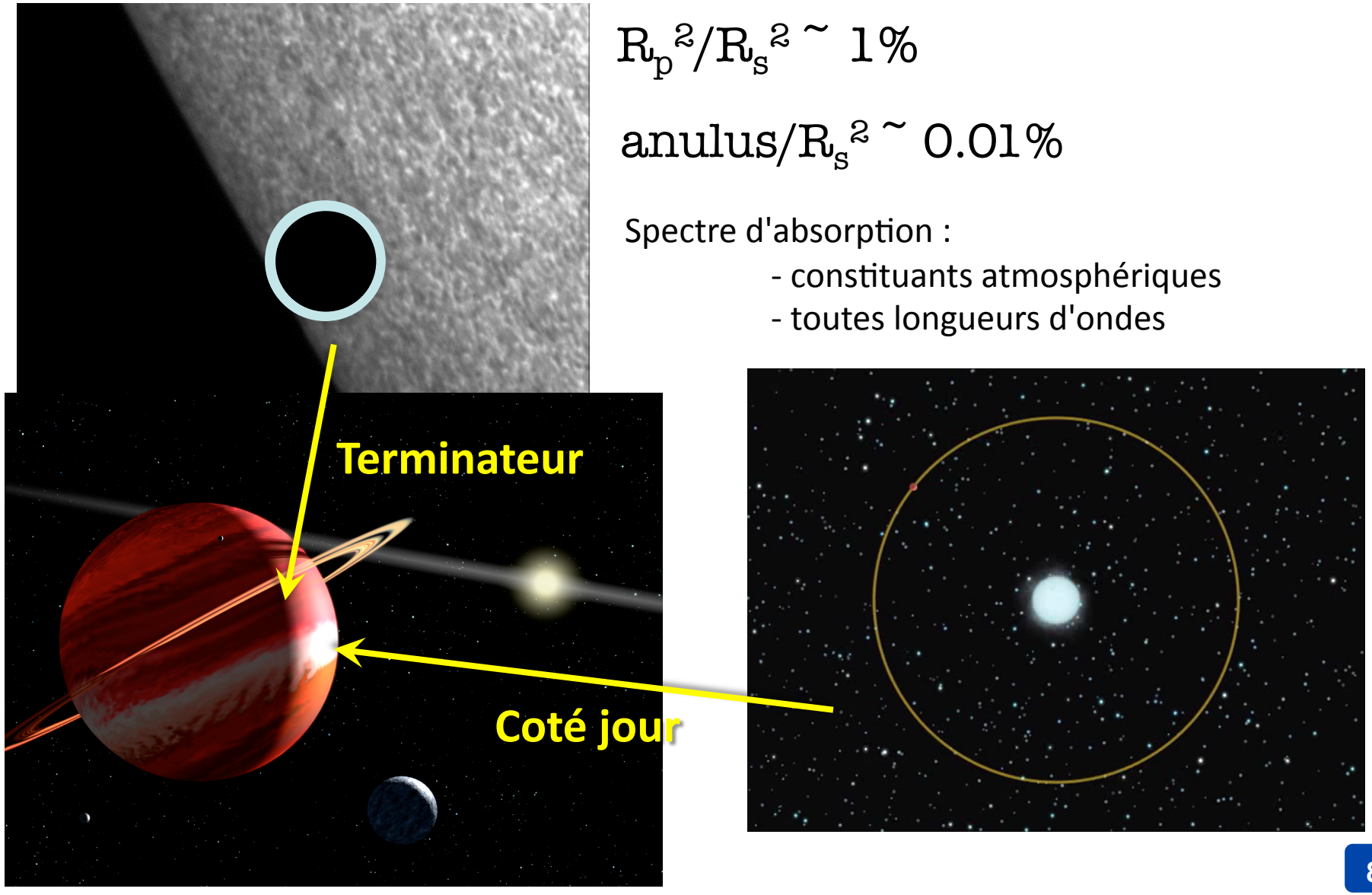






- distribution de la poussière
- propriétés des grains (couleur, polarisation)
- asymmétries, gaps, spirales, offsets
  => indices de planètes

Détection directe par transit



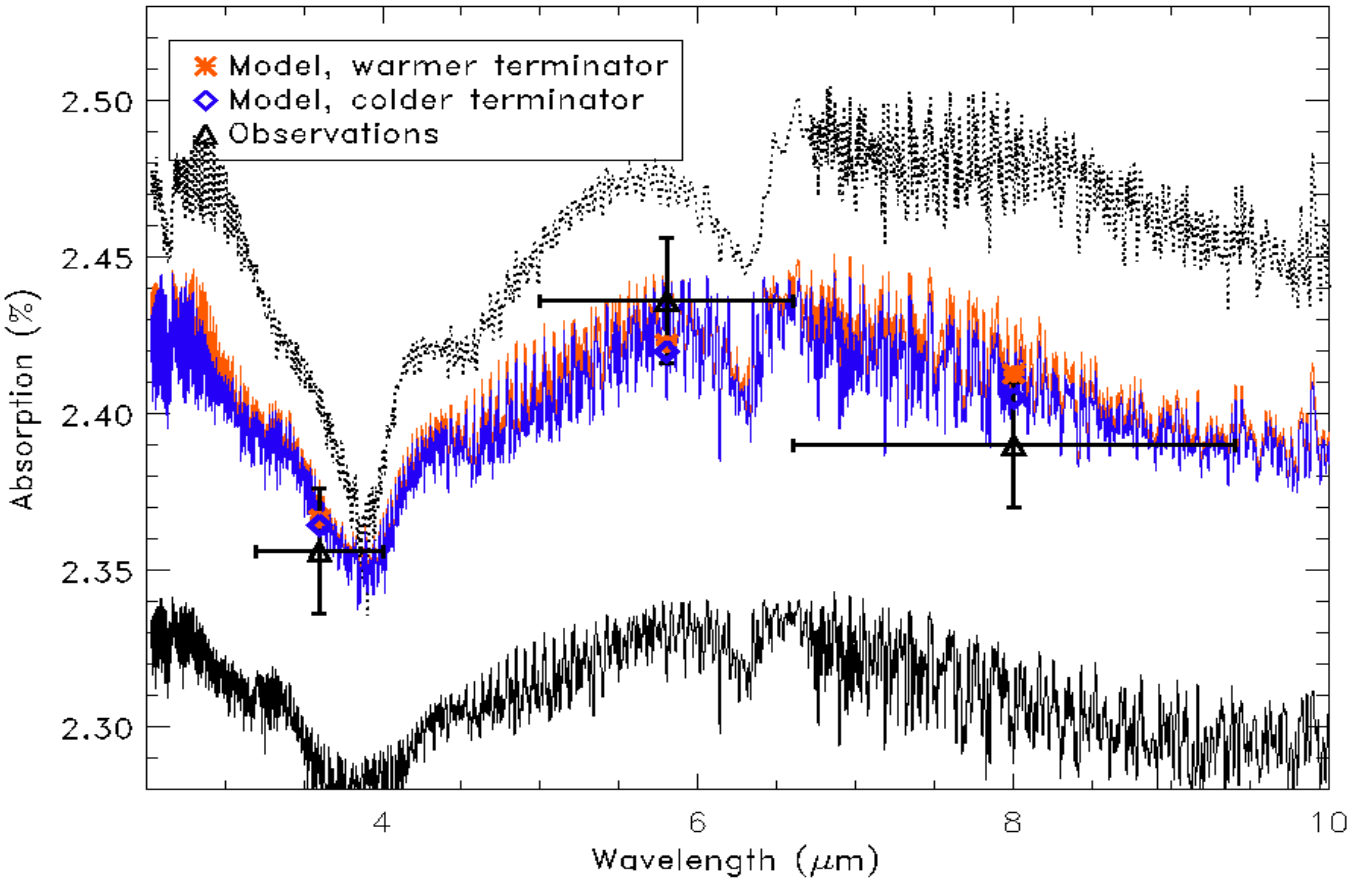
$R_p^2/R_s^2 \sim 1\%$

$anulus/R_s^2 \sim 0.01\%$

Spectre d'absorption :

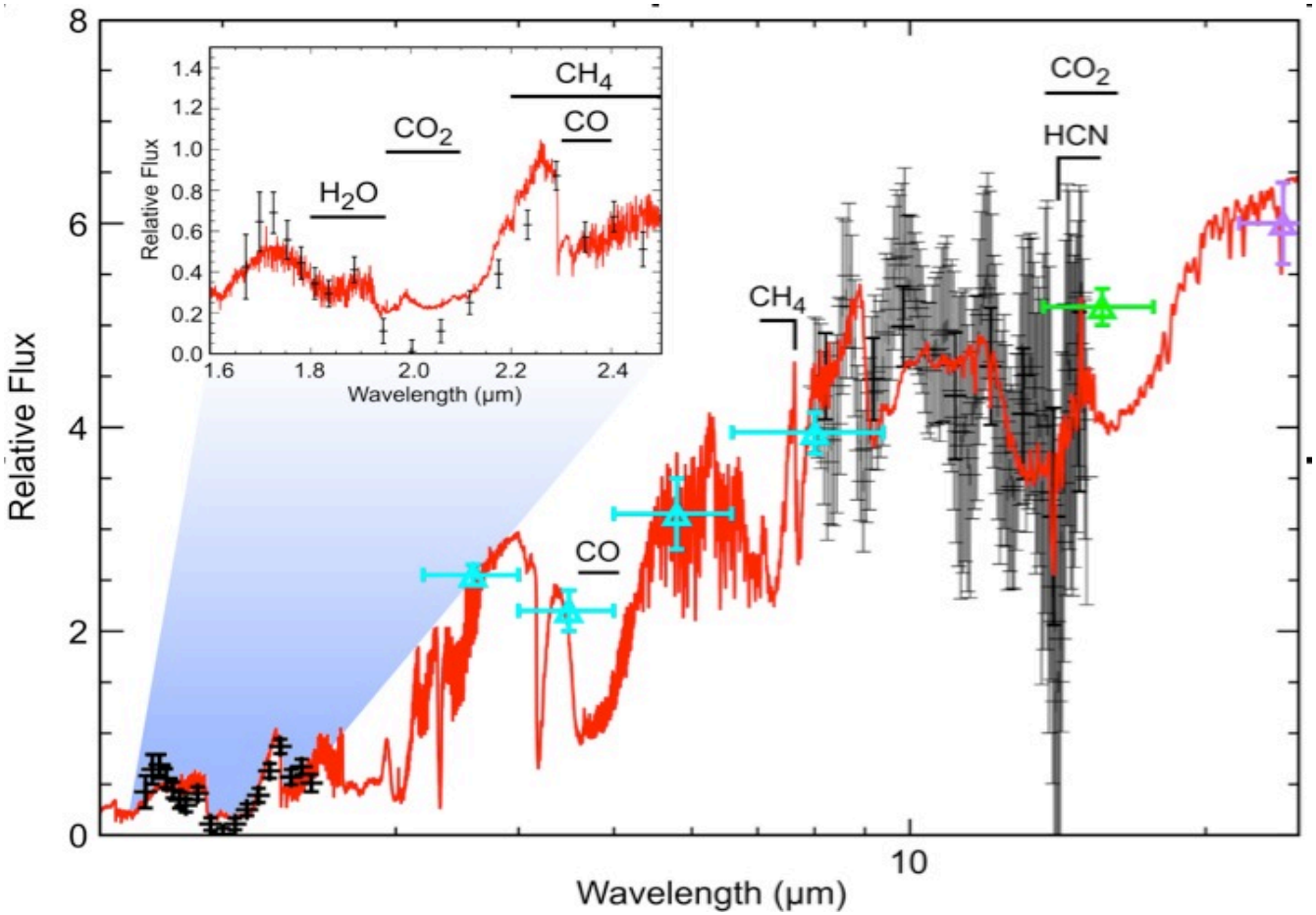
- constituants atmosphériques
- toutes longueurs d'ondes

Détection directe par transit



Détection de vapeur d'eau
HD189733b, Tinetti et al. 2007

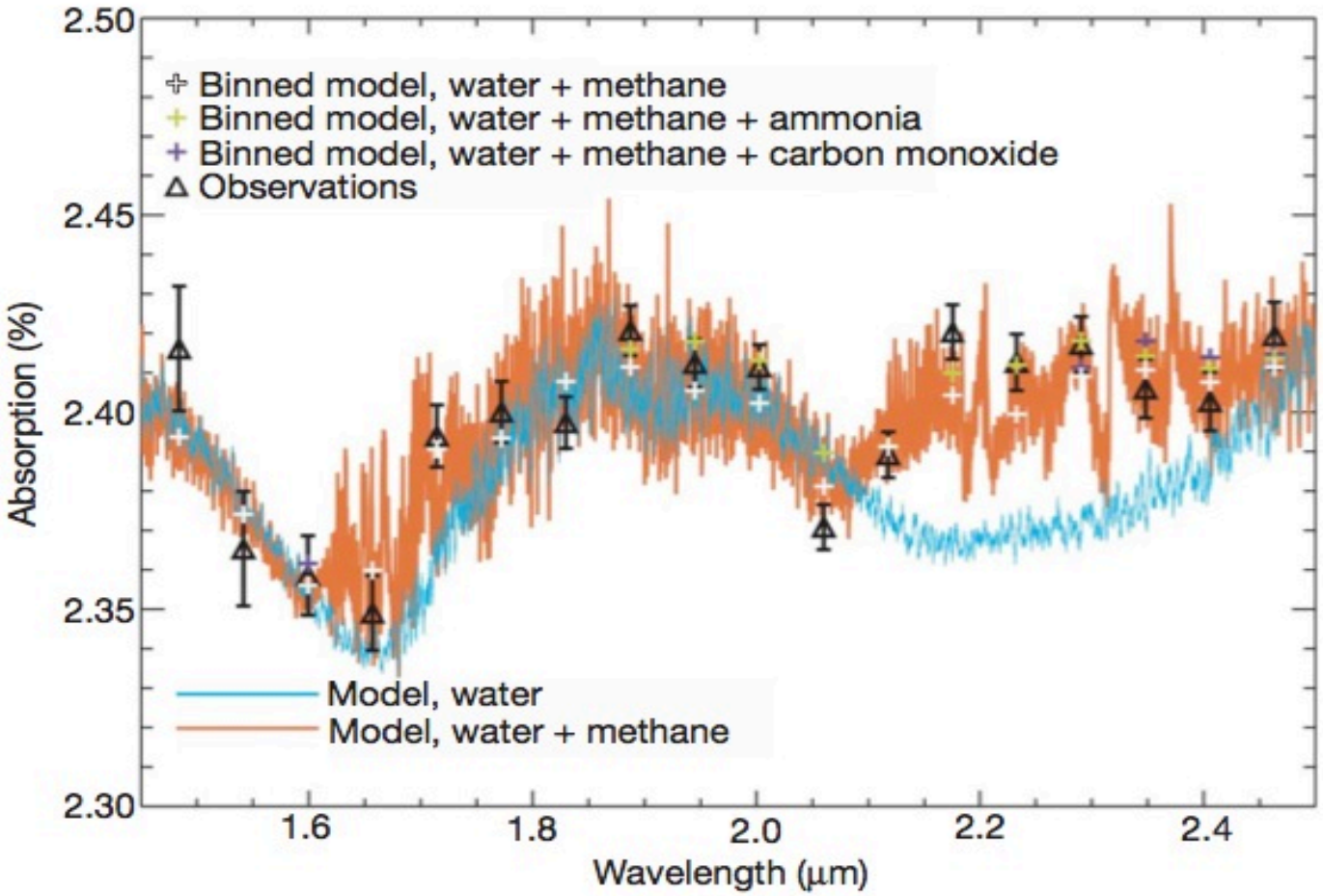
Détection directe par transit



Spectre composite HD189733b

Swain et al. 2009, Grillmair et al. 2007, Charbonneau et al. 2008, Deming et al. 2006

Détection directe par transit

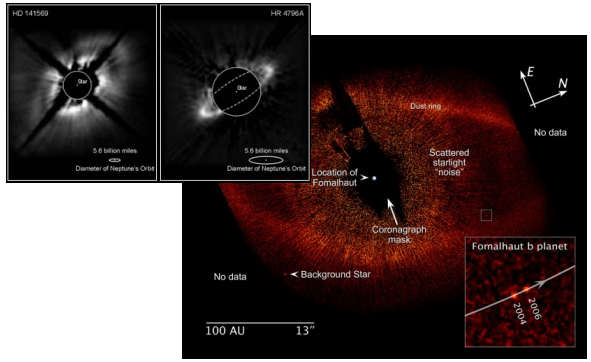


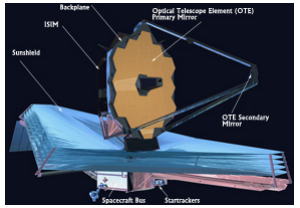
Spectre absorption NIR HD189733 b, Swain et al. 2008

Quelques projets d'imagerie

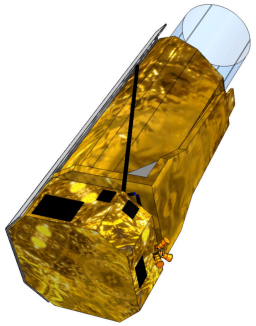
Space-based

HST





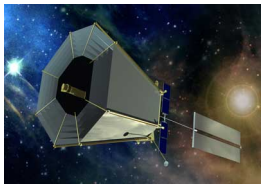
JWST
NIR + MIR:
Old EGPs



Small coronagraphs
Vis: Old Jupiter
+ Super Earth

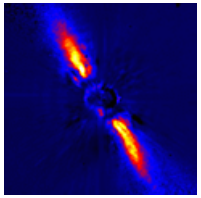
Darwin/TPF-I
MIR: Earth

TPF-C
Vis: Earth

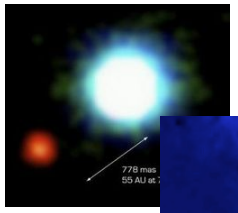


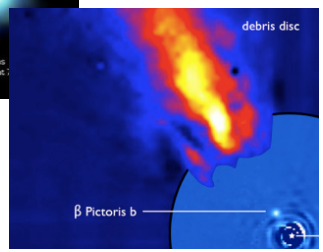
1995 | 2000 | 2008 | 2012 | 2020-2022 | >2025-30

4m + OA
Silla, CFH



8m + OA
VLT, Keck,
Gemini, Subaru

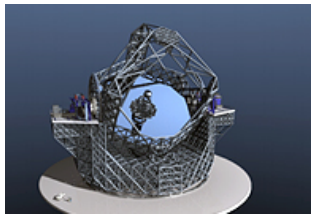




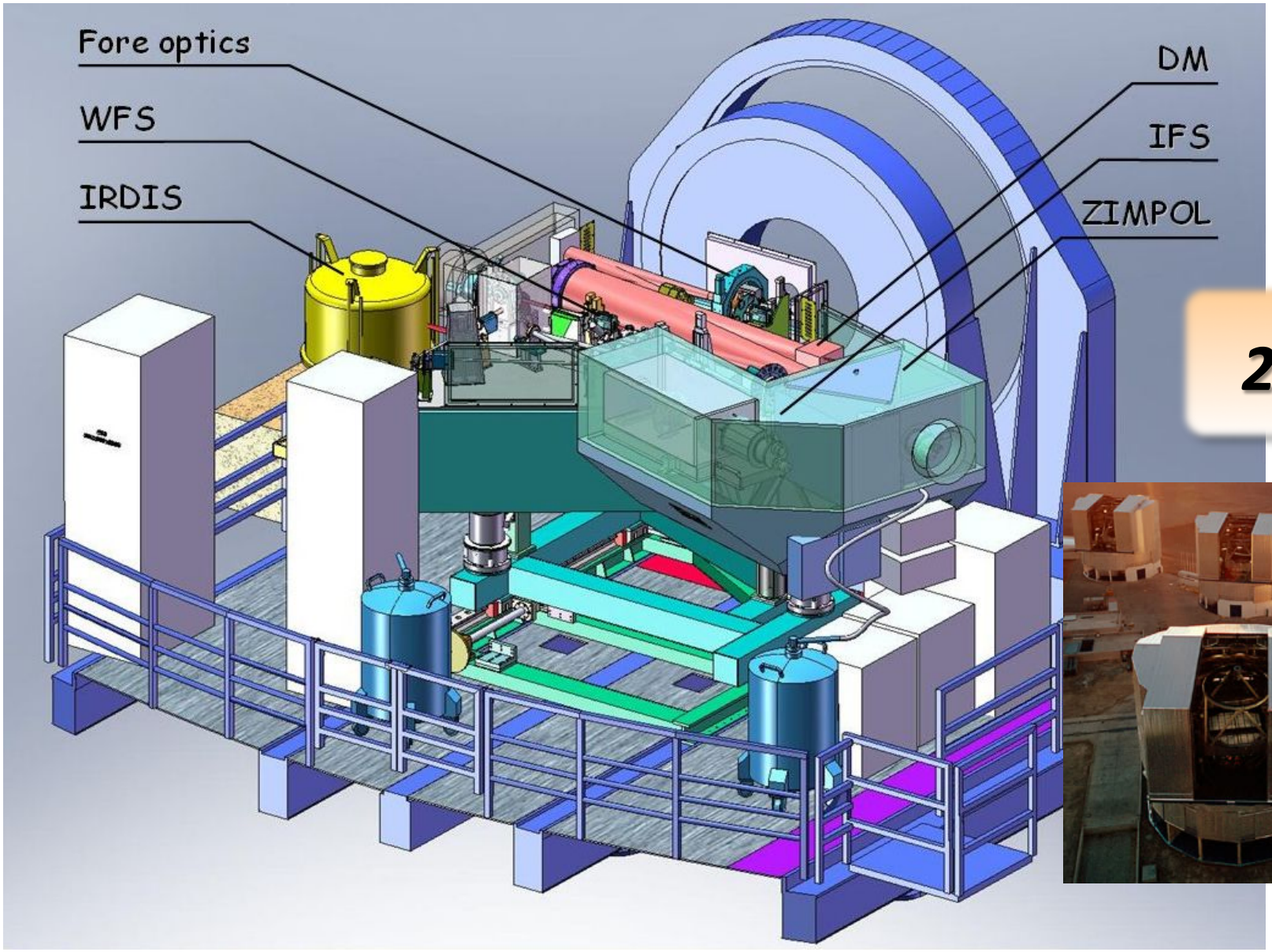
8m + XAO
SPHERE / GPI /
HiCIAO
NIR : EGPs young/
massive/nearby

Ground-based

30/42m + XAO
EPICS/ELTs
NIR : EGPs intermediate
Old + Super-Earth ?



SPHERE

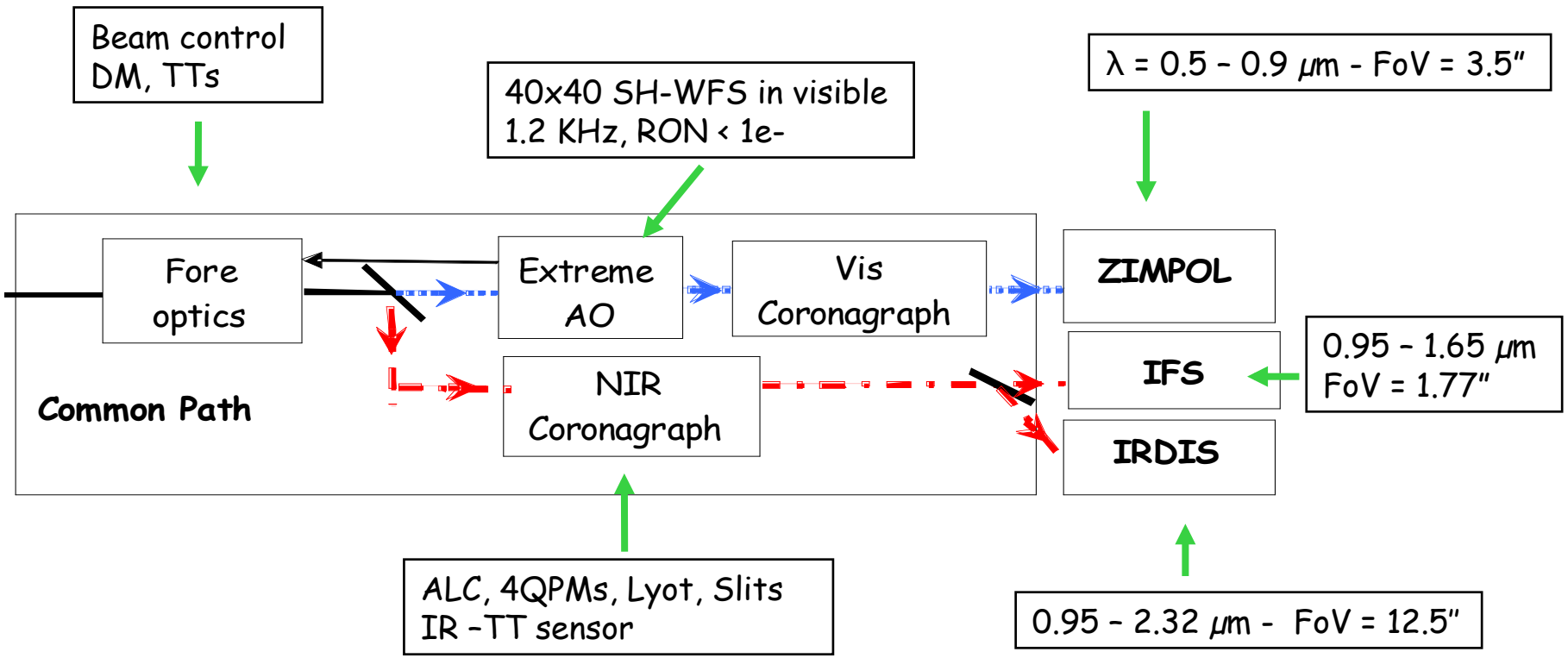


2012

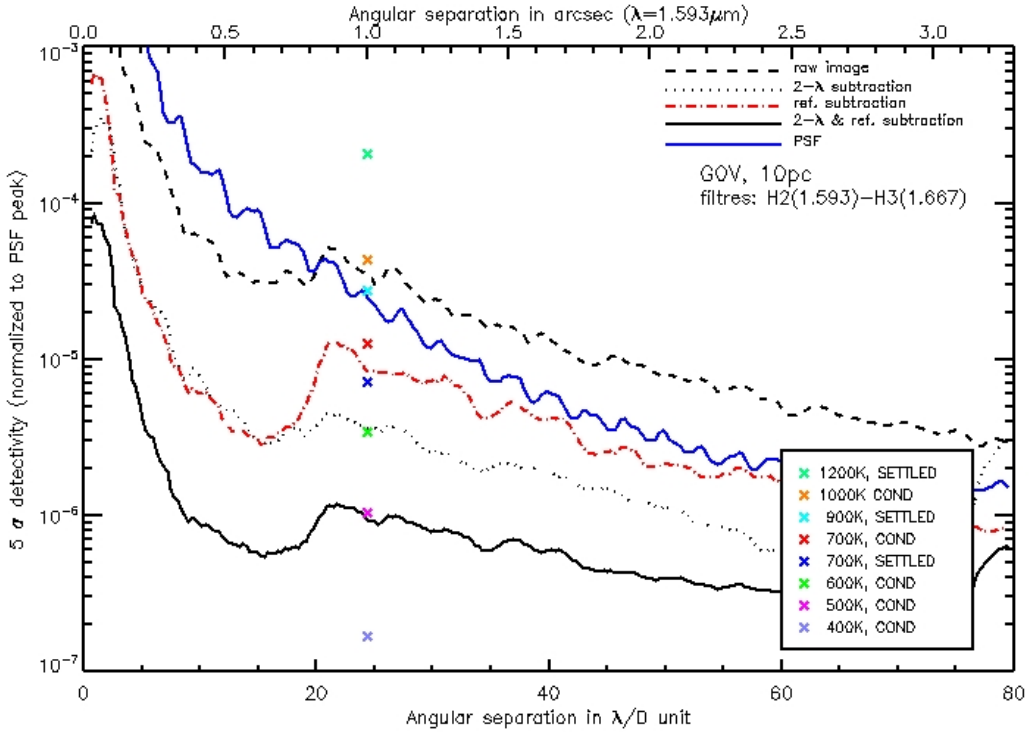
SPHERE: cibles

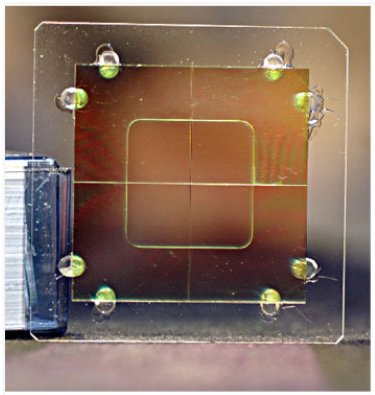
- Exoplanètes à grande séparation (plusieurs centaines d'objets)
  - Étoiles jeunes et proches (5-50 Myr) (détéction > 0.5 M_J)
  - Étoile F-K jeunes et actives (0.1 – 1 Gyr)
  - Étoiles de type tardifs (K-M)
  - Systèmes planétaires connus (par d'autres techniques)
  - Étoiles très proches (< 6 pc)

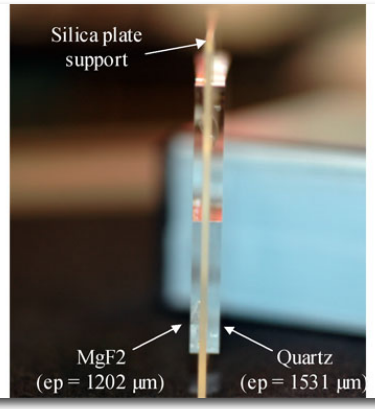
SPHERE: concept

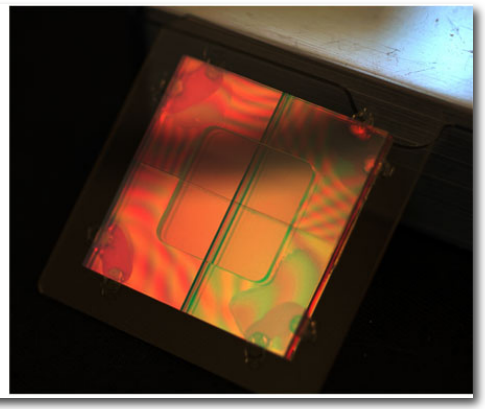


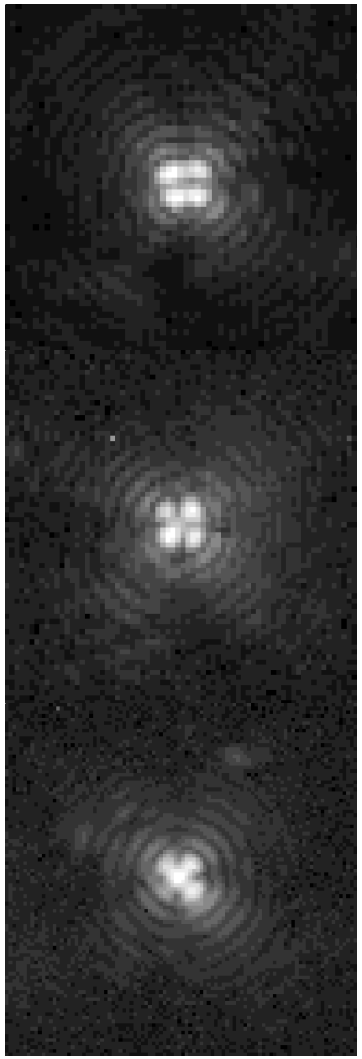
SPHERE: estimation performance



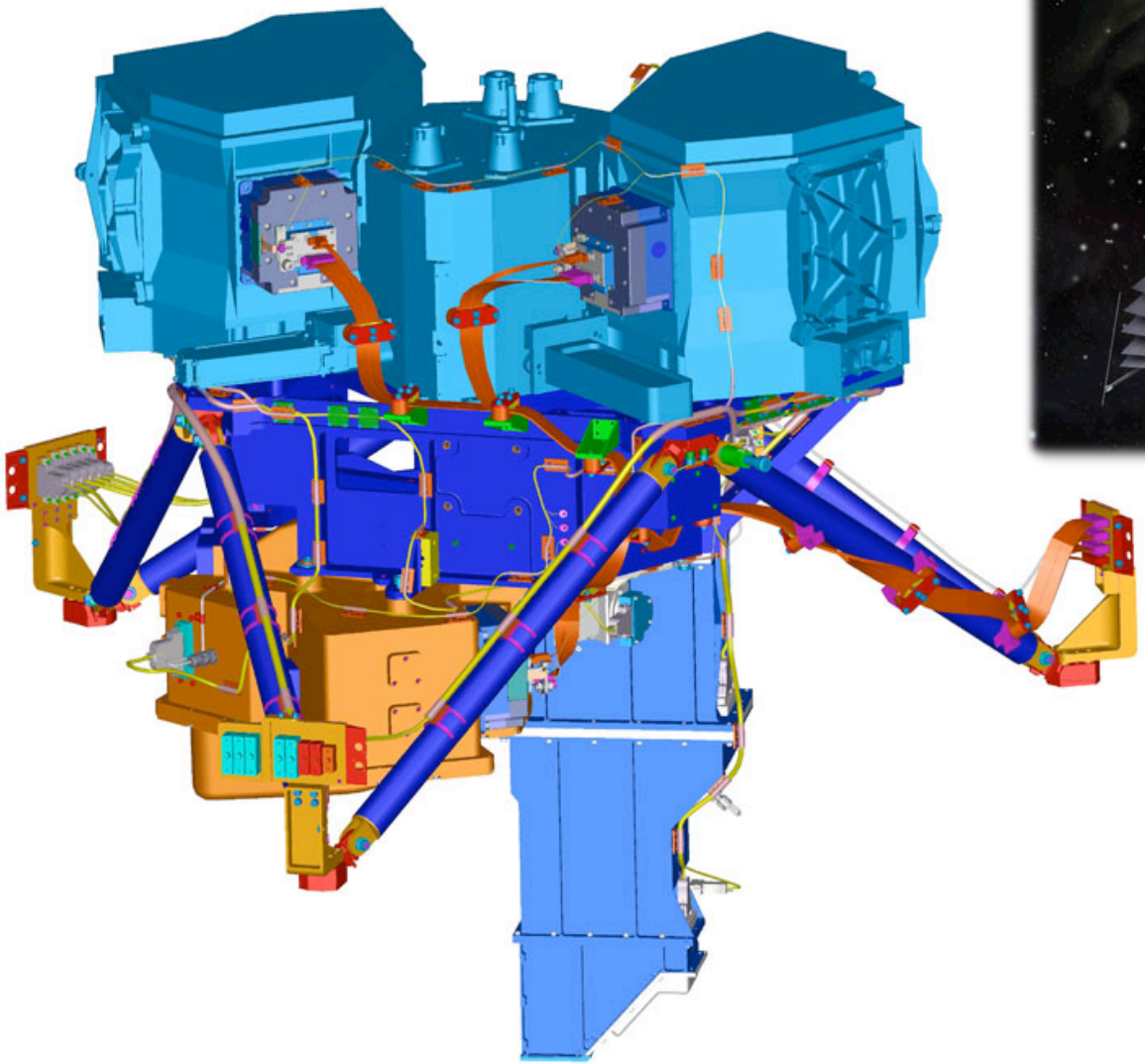


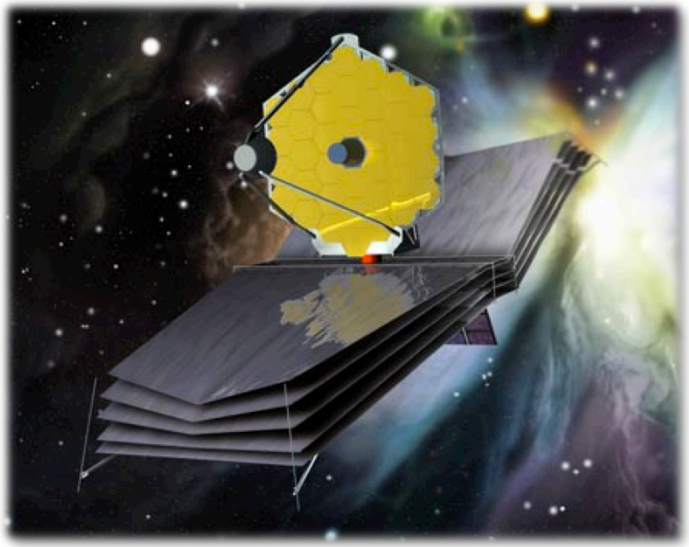






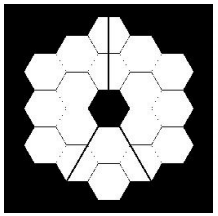
MIRI / JWST



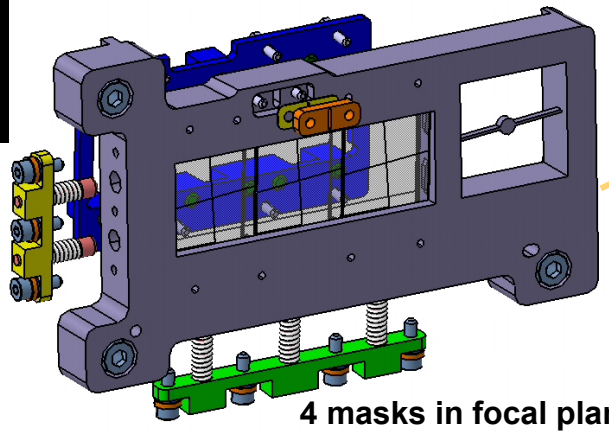


2015

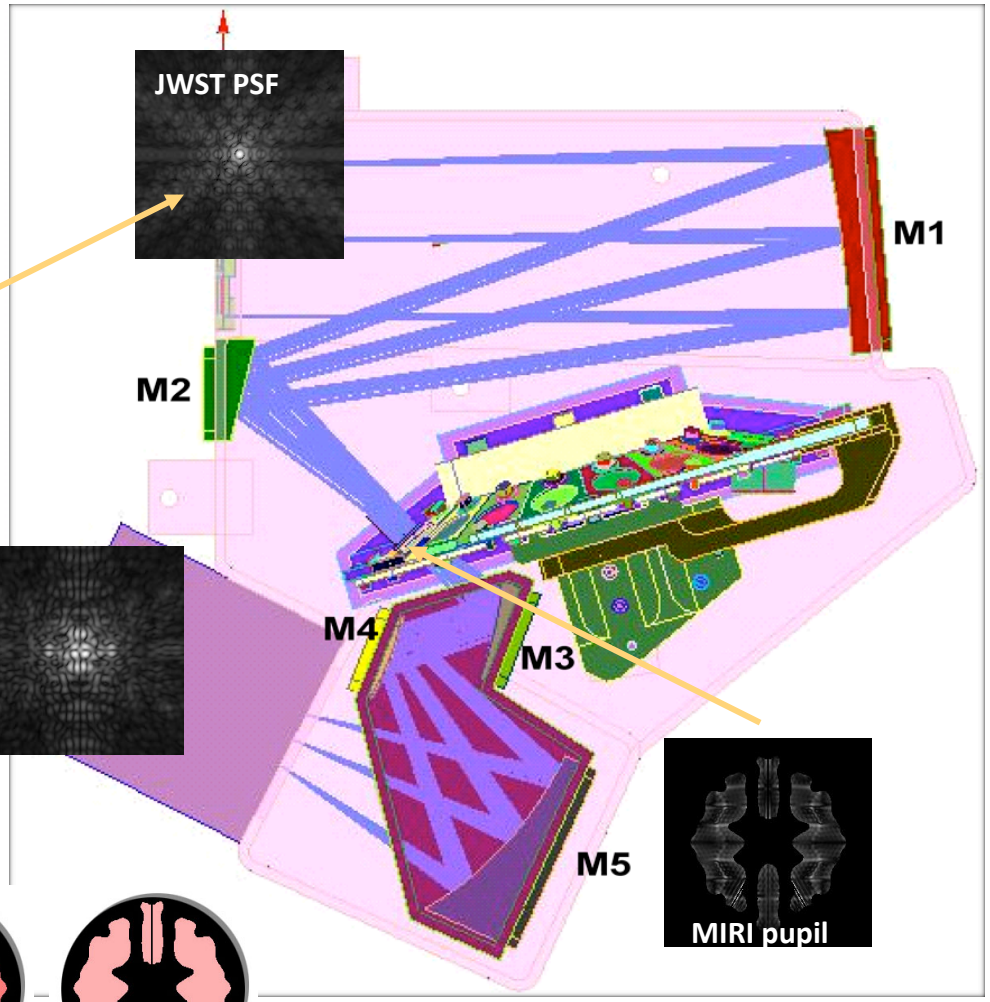
MIRI: concept



monochromatic coronagraphs

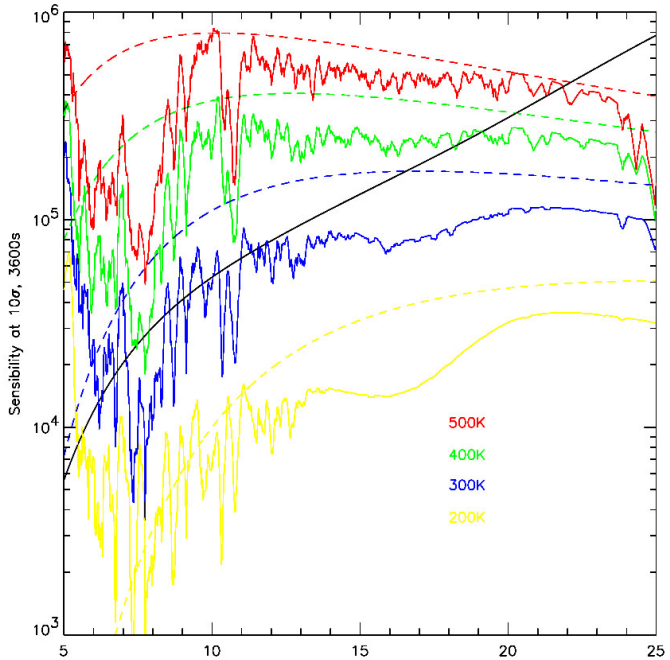


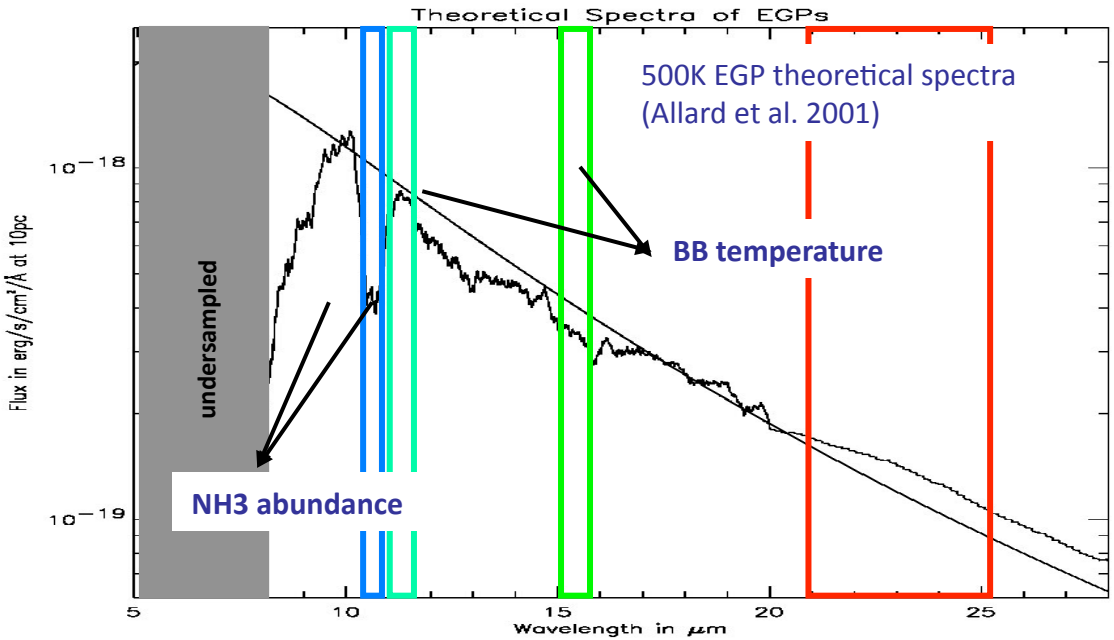
4 masks in focal plane



ND	Lyot diaph. + 23 µm filter	4Q diaph. + 15.5 µm filter	4Q diaph. + 11.4 µm filter	4Q diaph. + 10.65 µm filter

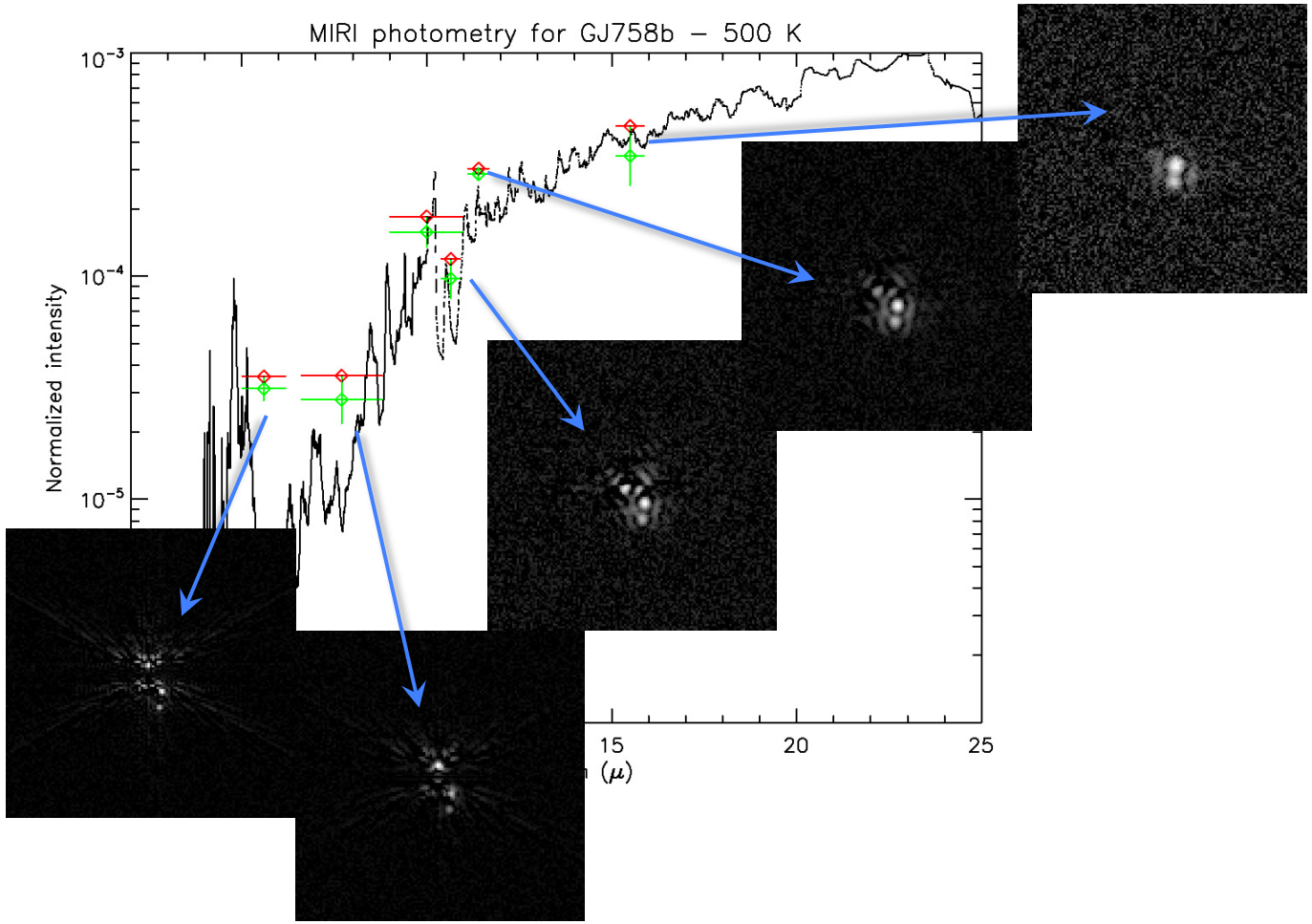
MIRI: modes coronographiques





- filter 1 : Phase mask, characterization at λ=10.65μm, R=20 (NH_3)
- filter 2 : Phase mask, λ=11.40μm, R=20 (continuum + silicates & PAH)
- filter 3 : Phase mask, λ=15.5μm, R=20 (continuum)
- filter 4 : Lyot mask, λ=23μm, R=5 (cold silicates)

MIRI: performance



Futurs projets

Vitesses radiales :

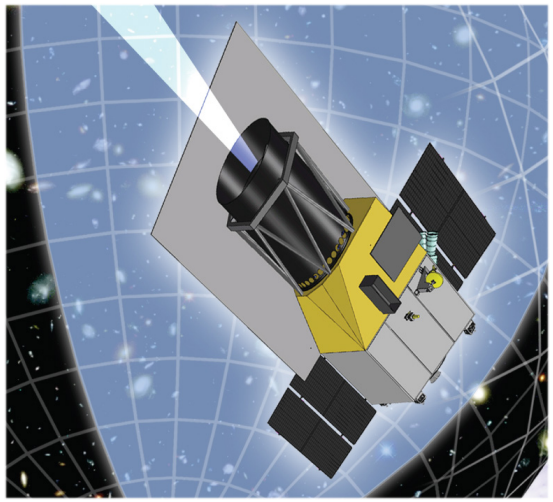
- ESPRESSO / VLT
- CODEX / ELT

Transit :

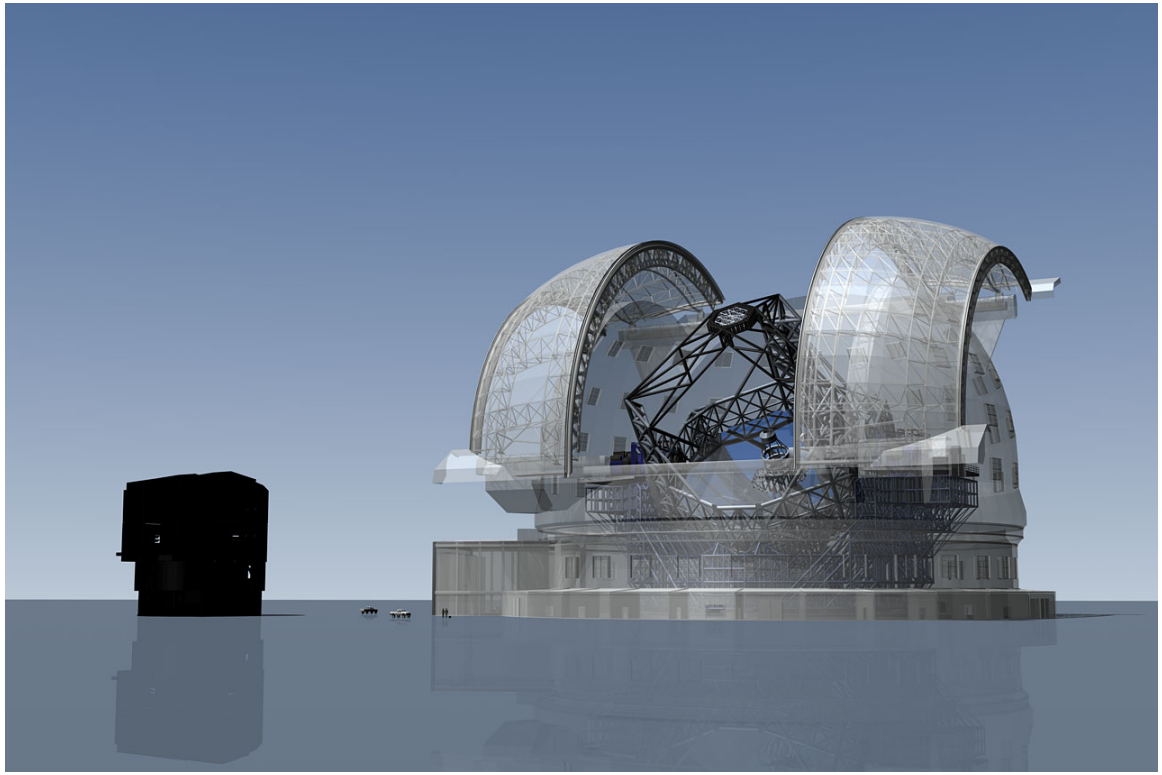
- PLATO / ESA

Micro-lensing :

- EUCLID / ESA
- WFIRST / NASA

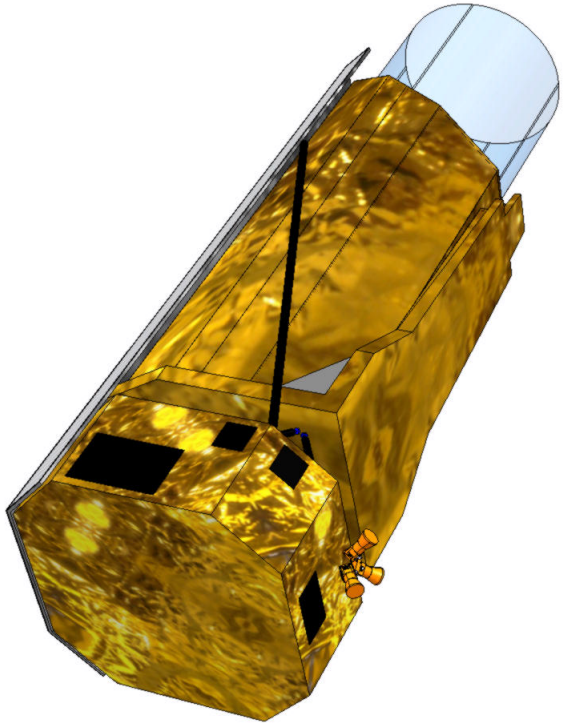


Futurs Projets



Extremely Large Telescopes on the ground = 30-42m

Space telescope 1-2m



Un jour peut être !!!

Merci ….

- Anthony.boccaletti@obspm.fr