

Exoplanètes

Formation, orbite, atmosphère
Modèles et observations

Raphaël Galicher
raphael.galicher at obspm.fr

M1 Observatoire de Paris 2015-2016

Les exoplanètes

Définition

Pourquoi les étudier ?

Qu'est-ce qu'une exoplanète ?

Planète en dehors du système solaire

→ autour d'une autre étoile que le Soleil

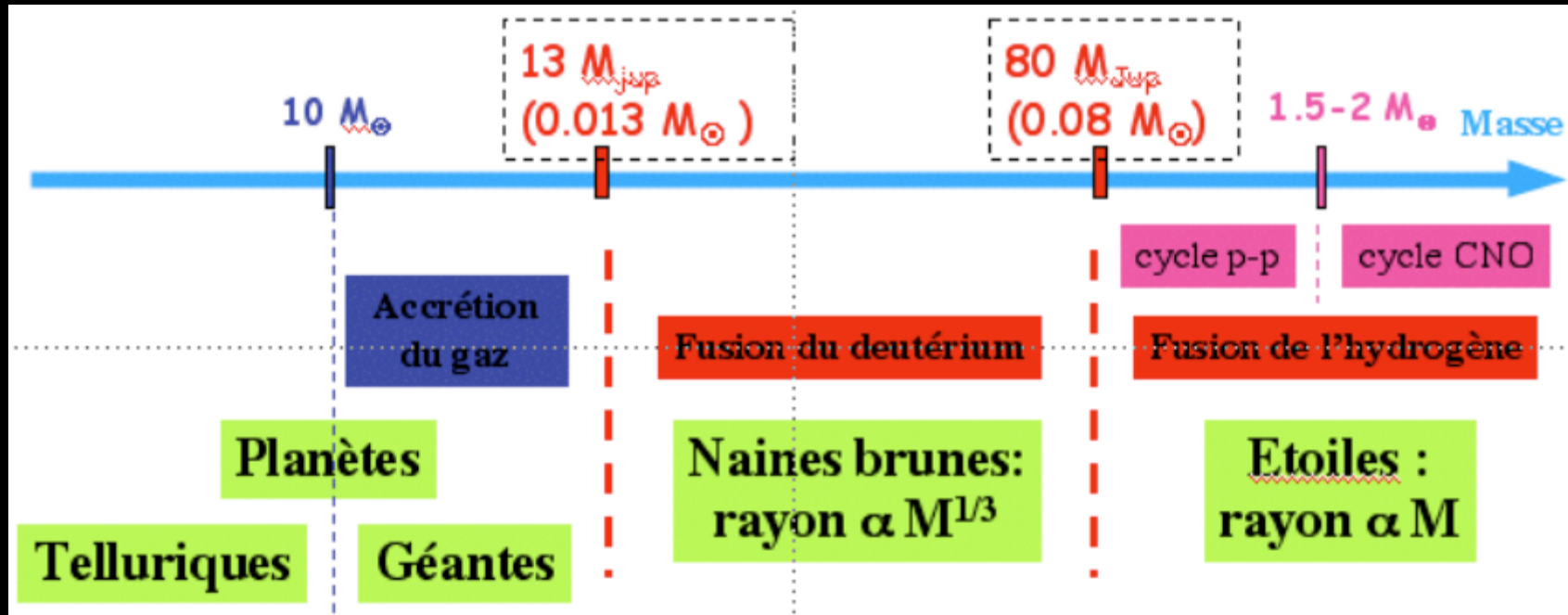
→ planètes flottantes

Mais pas suffisant...

Planète = ?

Définition d'une exoplanète

- À partir de la masse ?



- À partir du mode de formation ?
Mais comment déterminer le processus de formation a posteriori ?

Dans ce cours, on étudie les objets sub-stellaires $< 25 M_{Jup}$
et on les appelle “exoplanètes”

Pourquoi étudier les exoplanètes ?

Formation planétaire

Accrétion, instabilité gravitationnelle, autres ?

Mouvements orbitaux et propres

Stabilité, résonances, systèmes multi-planétaires

Structures internes des planètes

Terre, super-Terre, planète océan, Neptune, Jupiter

Atmosphères planétaires

Composition, évolutions saisonnières/journalières

Vies extra-terrestres

Mais il faudrait déjà définir ce qu'est la vie !

Plan du cours

Les observations

Modèle de formation planétaire

Planètes telluriques : accrétion

Planètes géantes : accrétion

Planètes géantes : instabilité gravitationnelle

Stabilité dynamique des orbites

Structure interne des planètes

Planètes gazeuses

Planètes géantes de glaces

Planètes telluriques

Atmosphères planétaires

Planètes telluriques

Planètes géantes gazeuses

Les observations

Masse demi-grand axe
Fréquence des exoplanètes
Eccentricités

Distribution des masses
Métallicité de l'étoile hôte

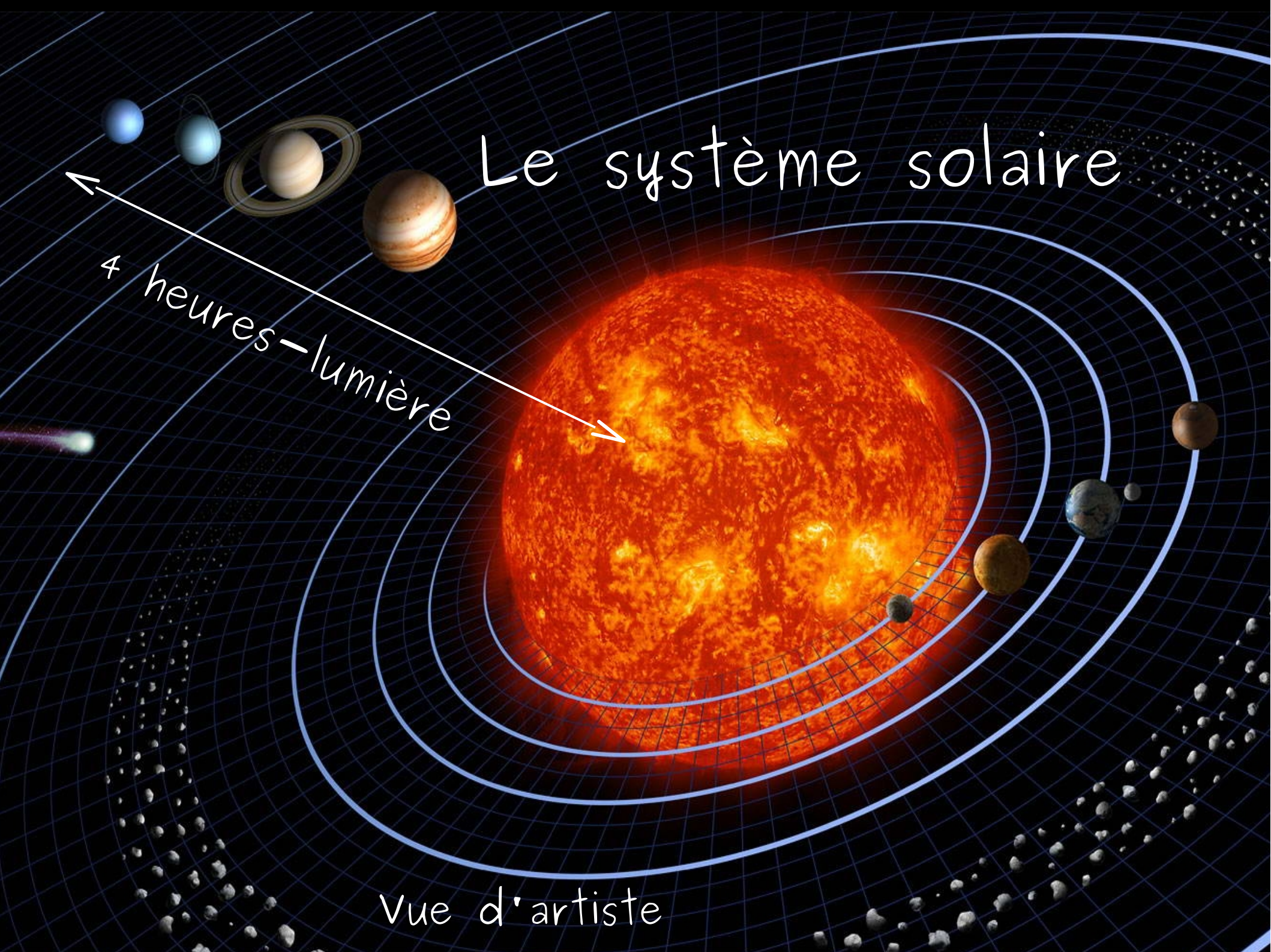
Densité

Spectres

Vitesse orbitale et rotation propre
Présence de disques circumstellaires

Le système solaire

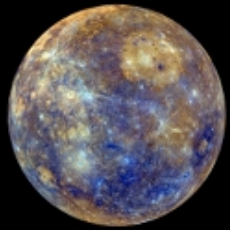
4 heures — lumière



The diagram illustrates the solar system with the Sun at the center, depicted as a large, glowing orange-yellow sphere. Concentric elliptical orbits are shown in light blue. Planets are placed along these orbits: Mercury (small blue sphere), Venus (light blue sphere), Earth (blue and white sphere), Mars (small reddish-brown sphere), Jupiter (large orange and white striped sphere), Saturn (tan sphere with prominent rings), Uranus (medium blue sphere), and Neptune (dark blue sphere). A comet with a long purple and white tail is shown on the left, moving towards the Sun. A white arrow points from the text '4 heures — lumière' to the Sun's surface.

Vue d'artiste

Planètes telluriques



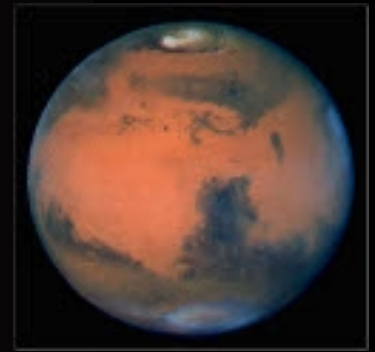
Mercury



Vénus



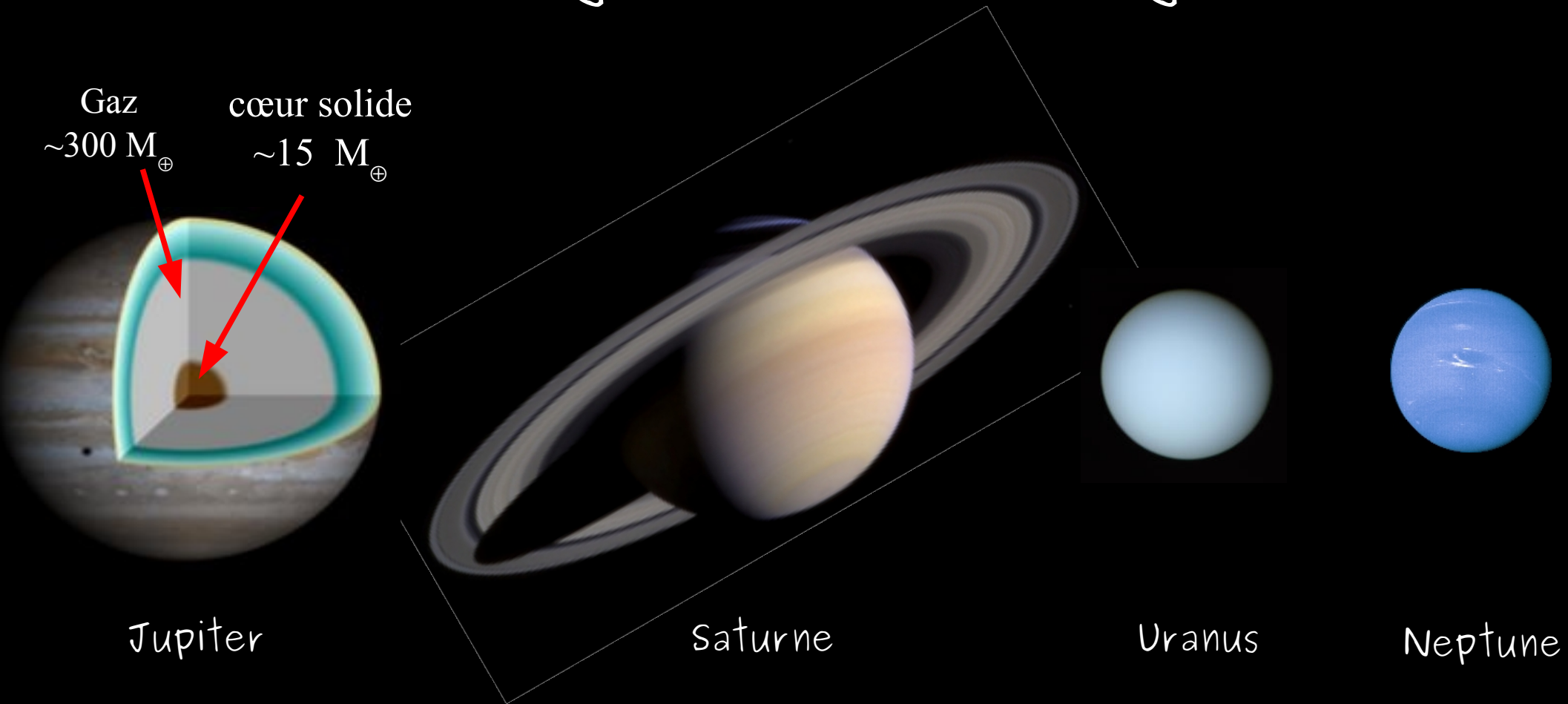
Terre



Mars

Corps solides avec/sans atmosphère, proches de l'étoile, faibles masses ($<1 M_{\oplus}$)

Géantes gazeuses et de glaces



Cœurs solides + enveloppe de gaz, loin de l'étoile (>5UA), grandes masses (>15 M_⊕)

Diagramme demi-grand axe vs masse

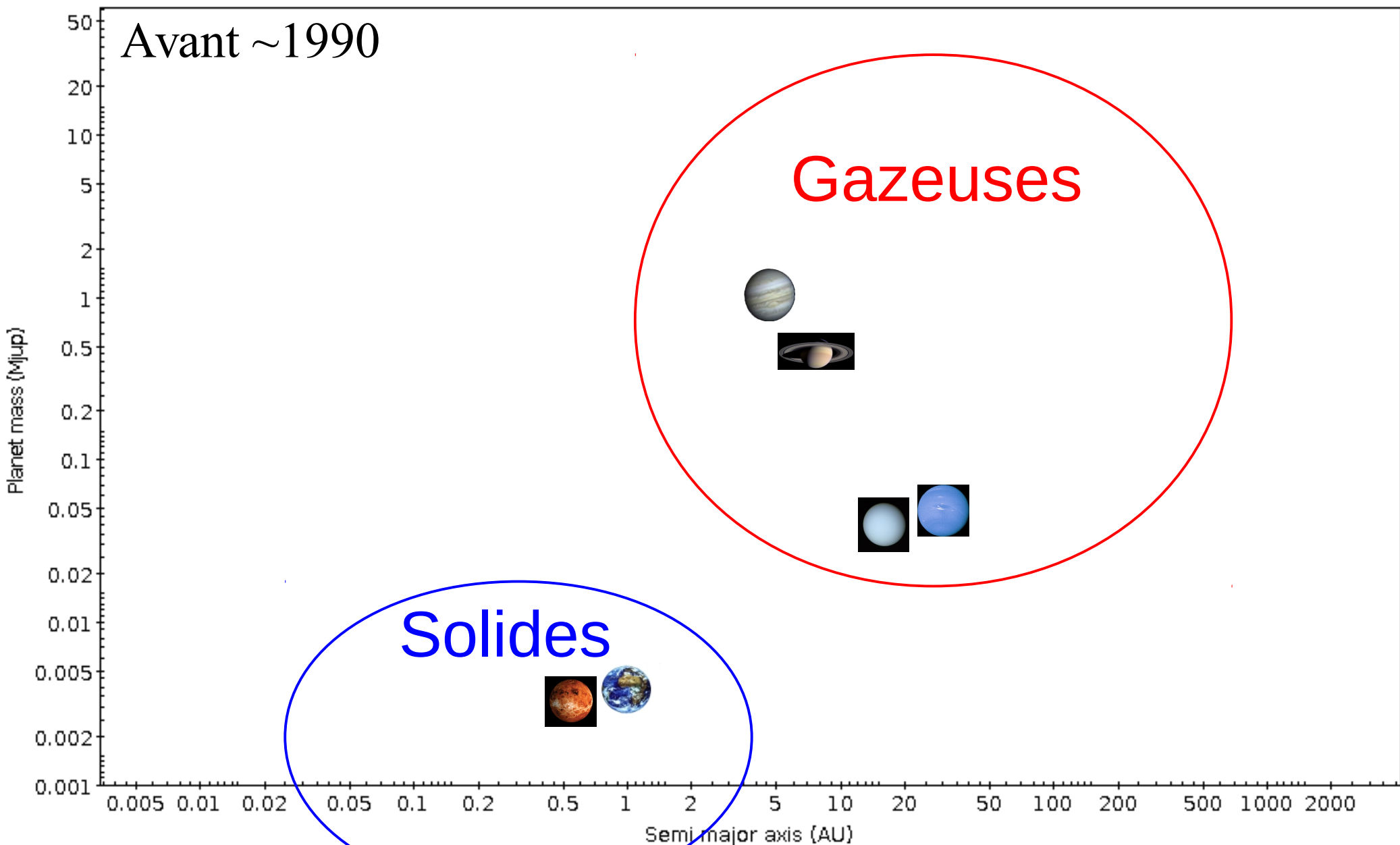


Diagramme demi-grand axe vs masse

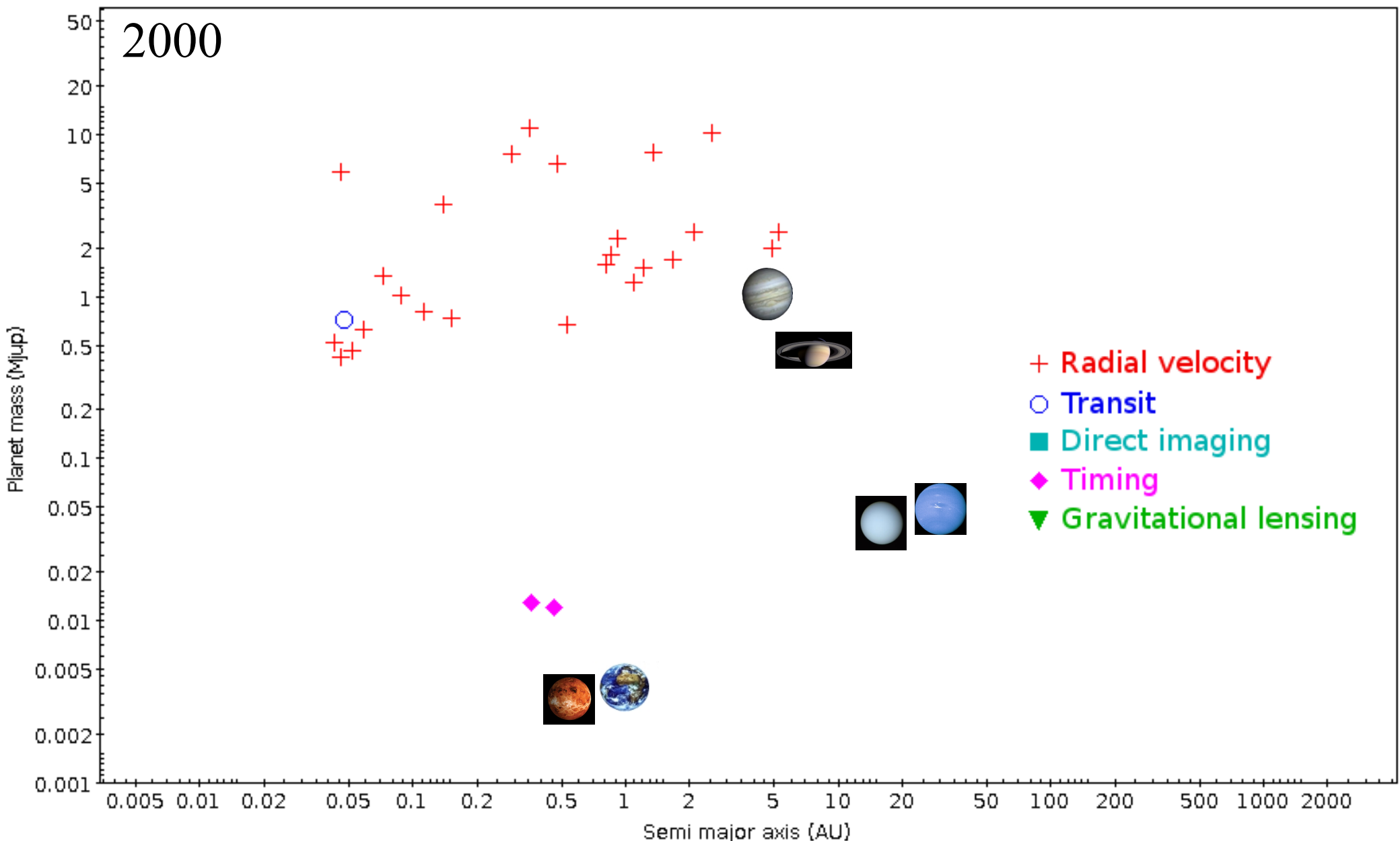


Diagramme demi-grand axe vs masse

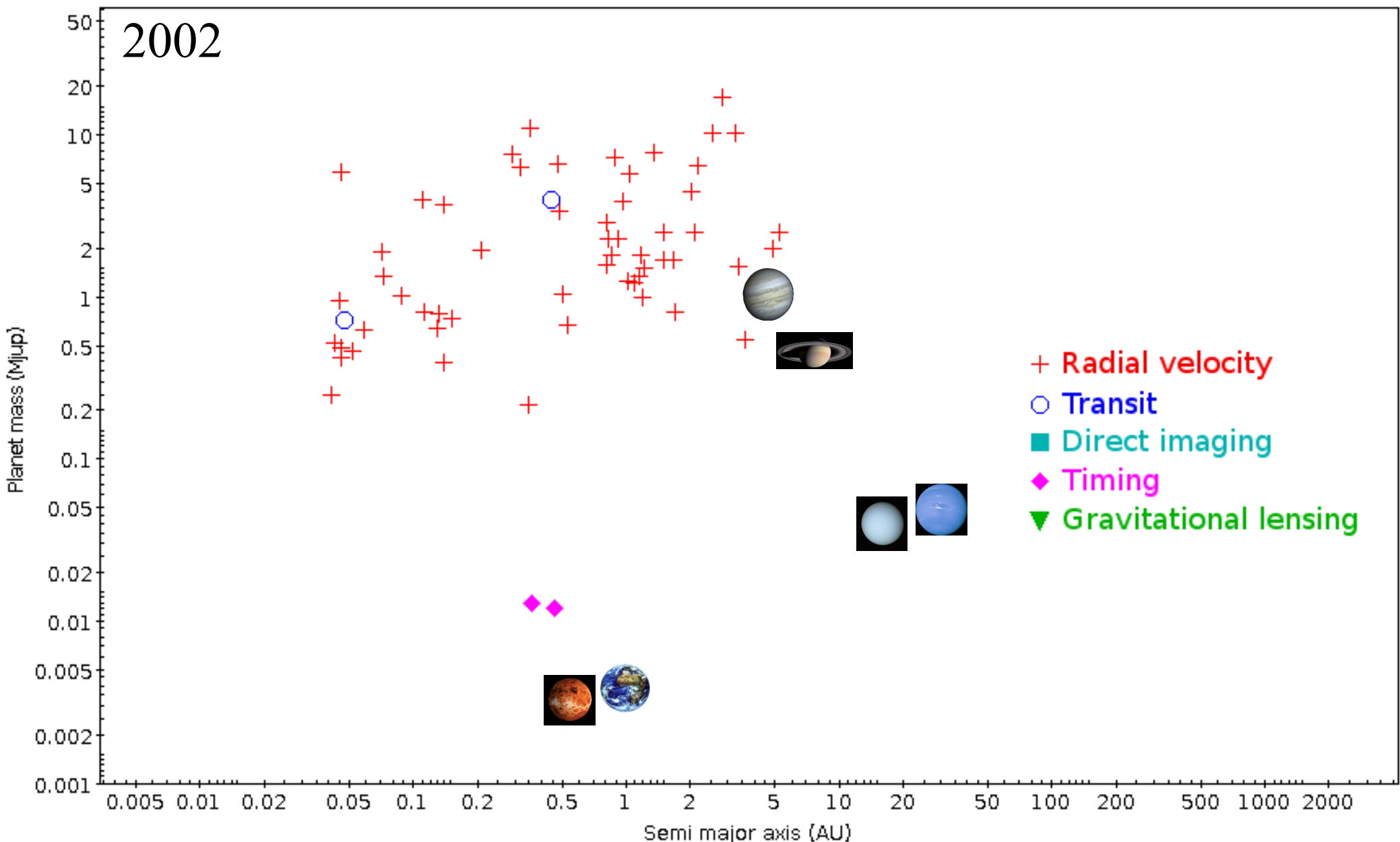


Diagramme demi-grand axe vs masse

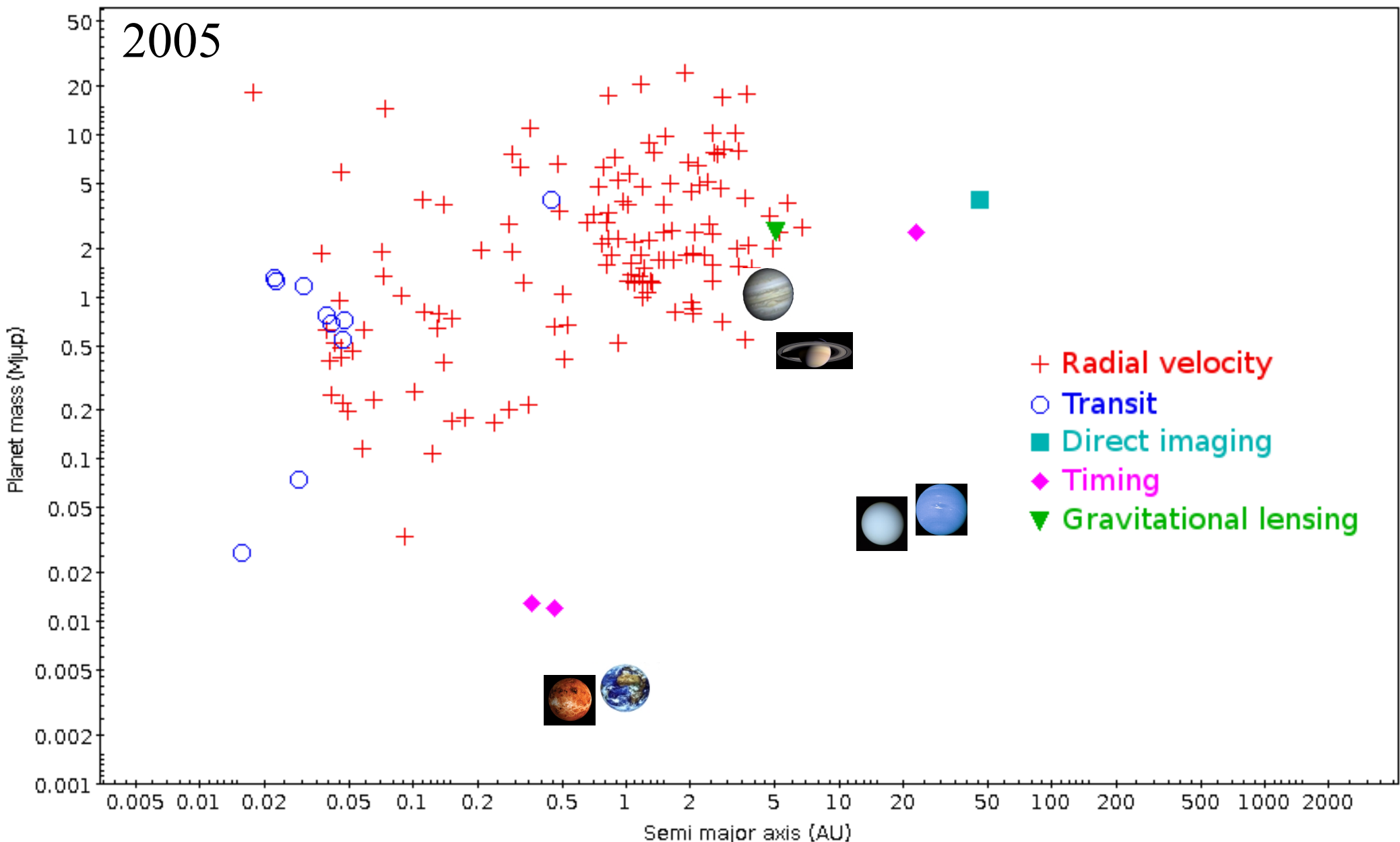


Diagramme demi-grand axe vs masse

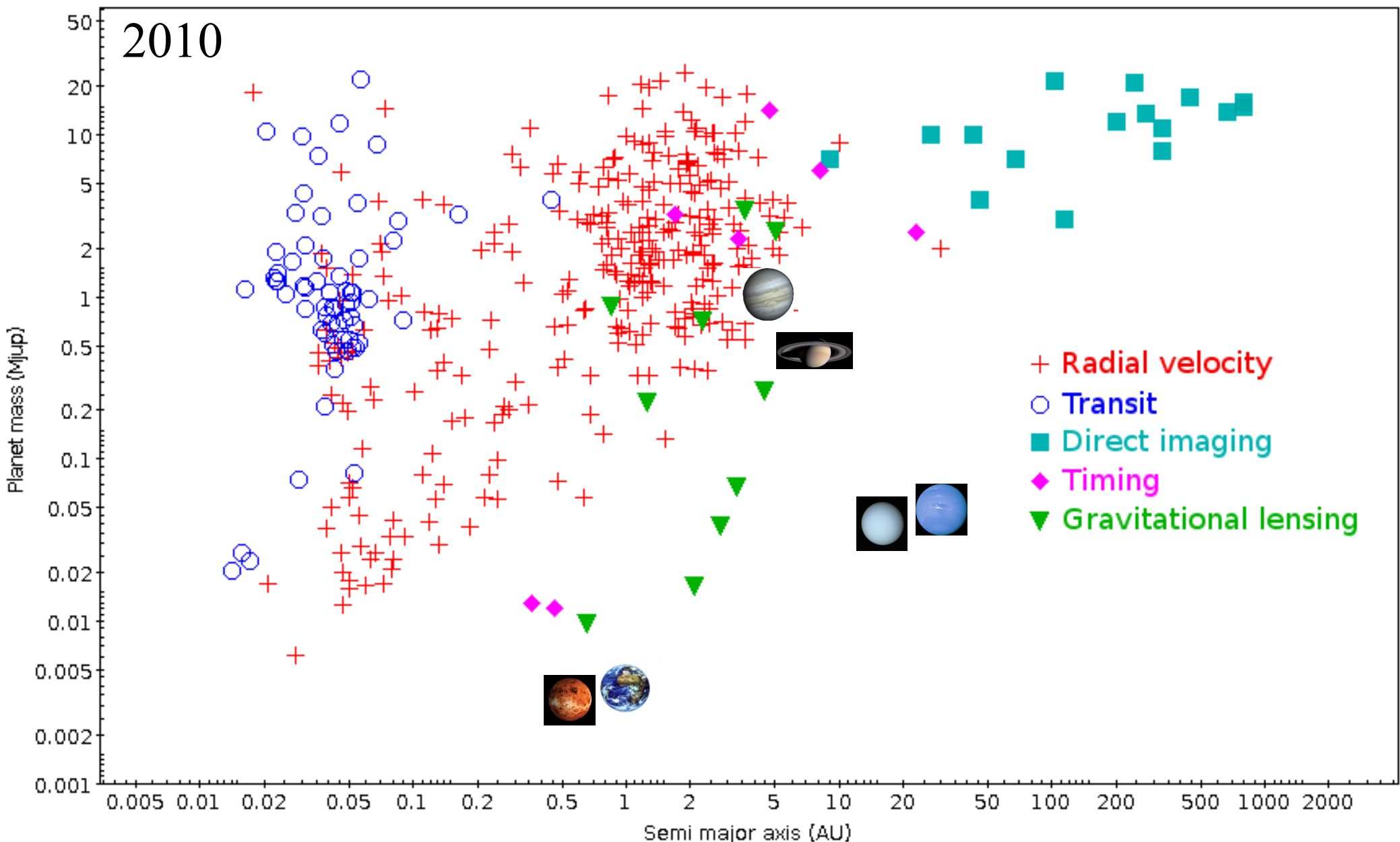


Diagramme demi-grand axe vs masse

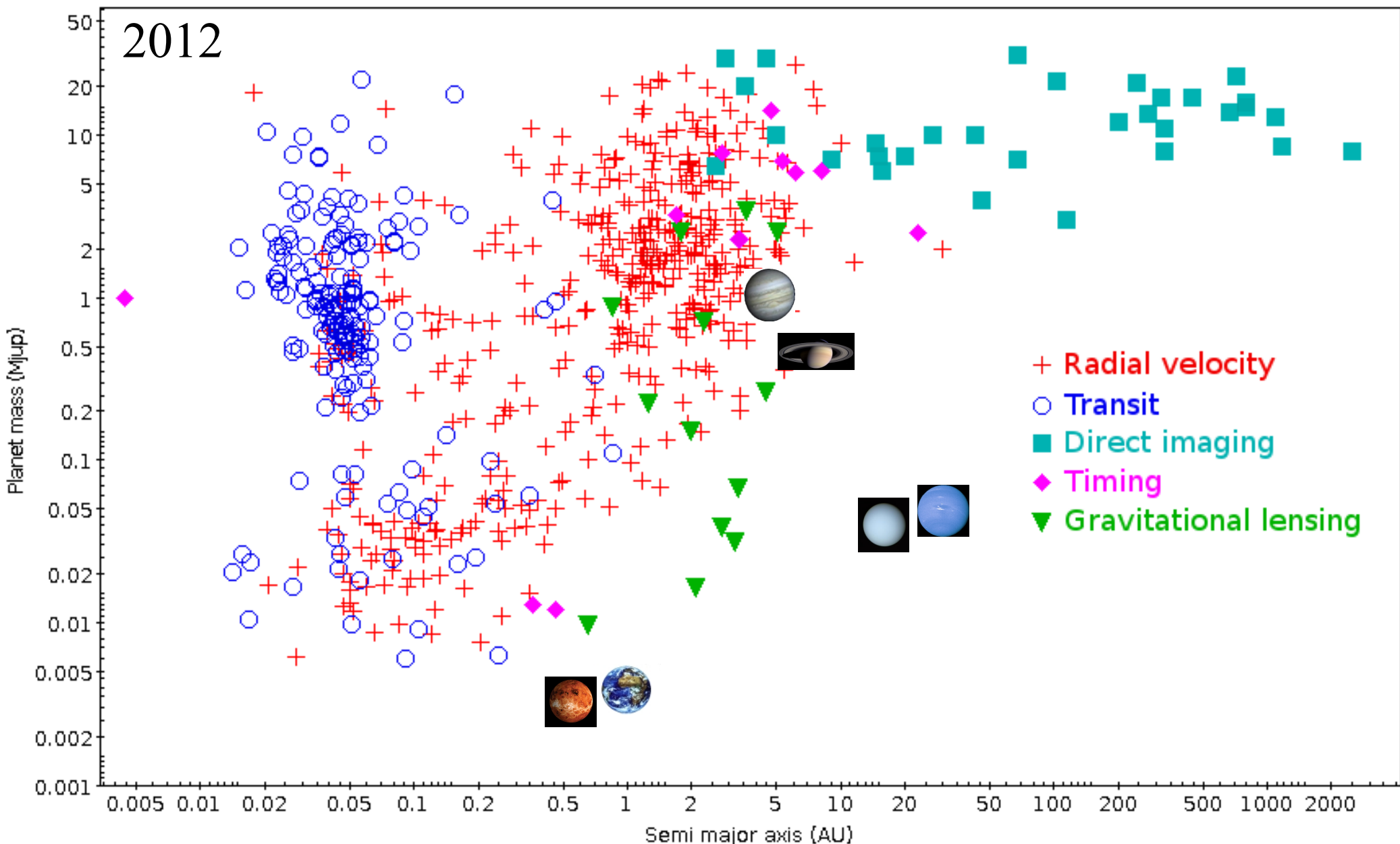


Diagramme demi-grand axe vs masse

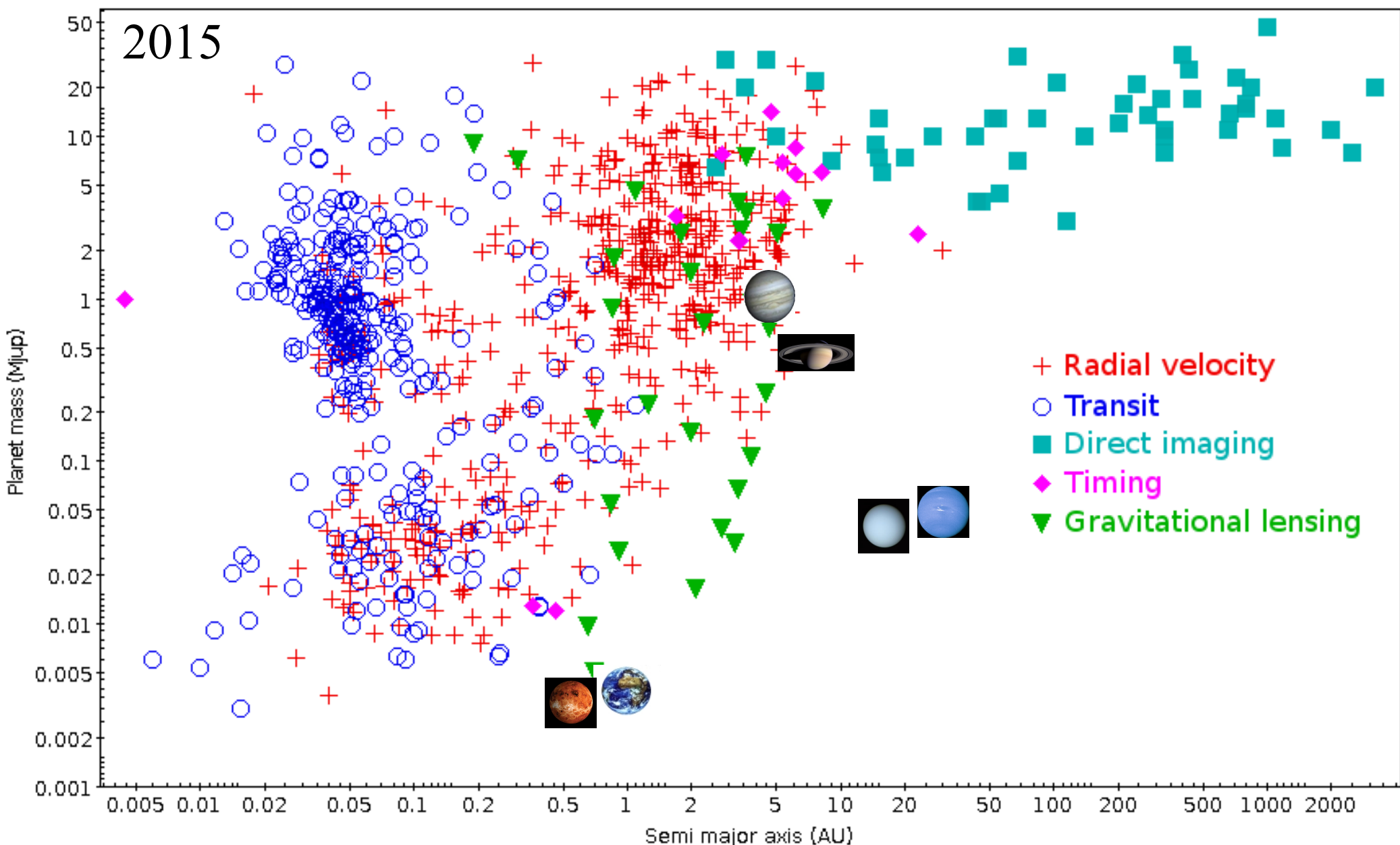


Diagramme demi-grand axe vs masse

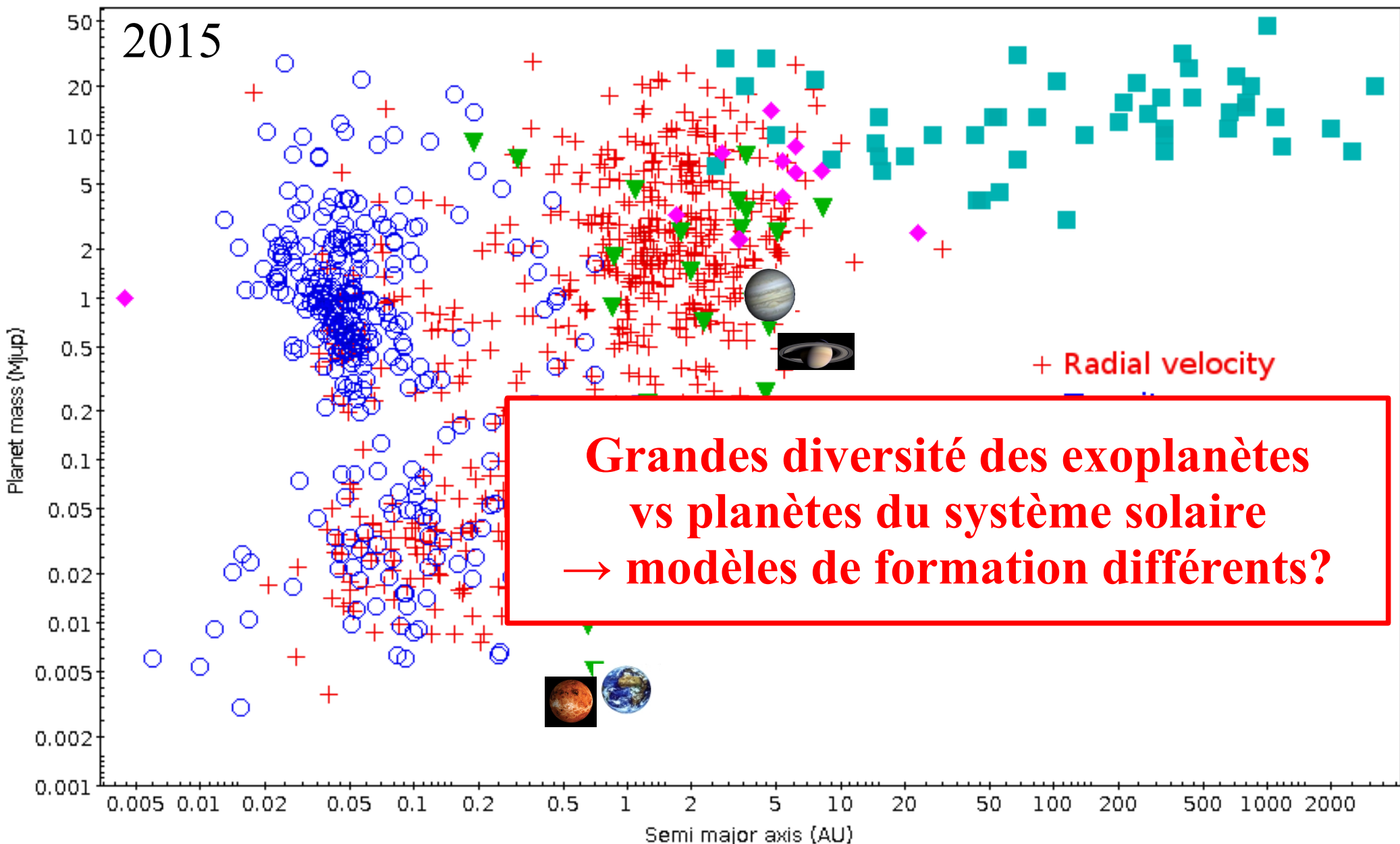
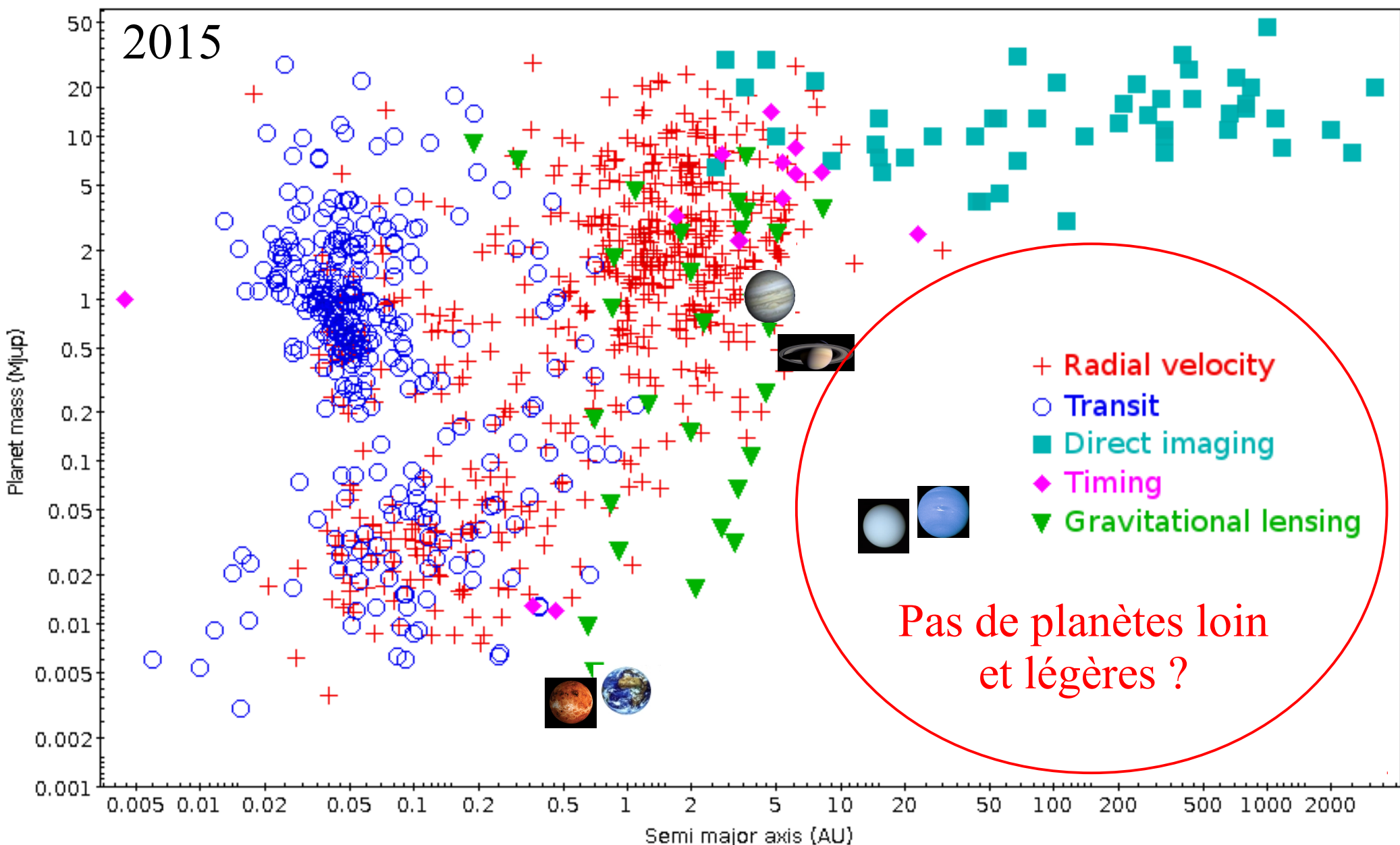
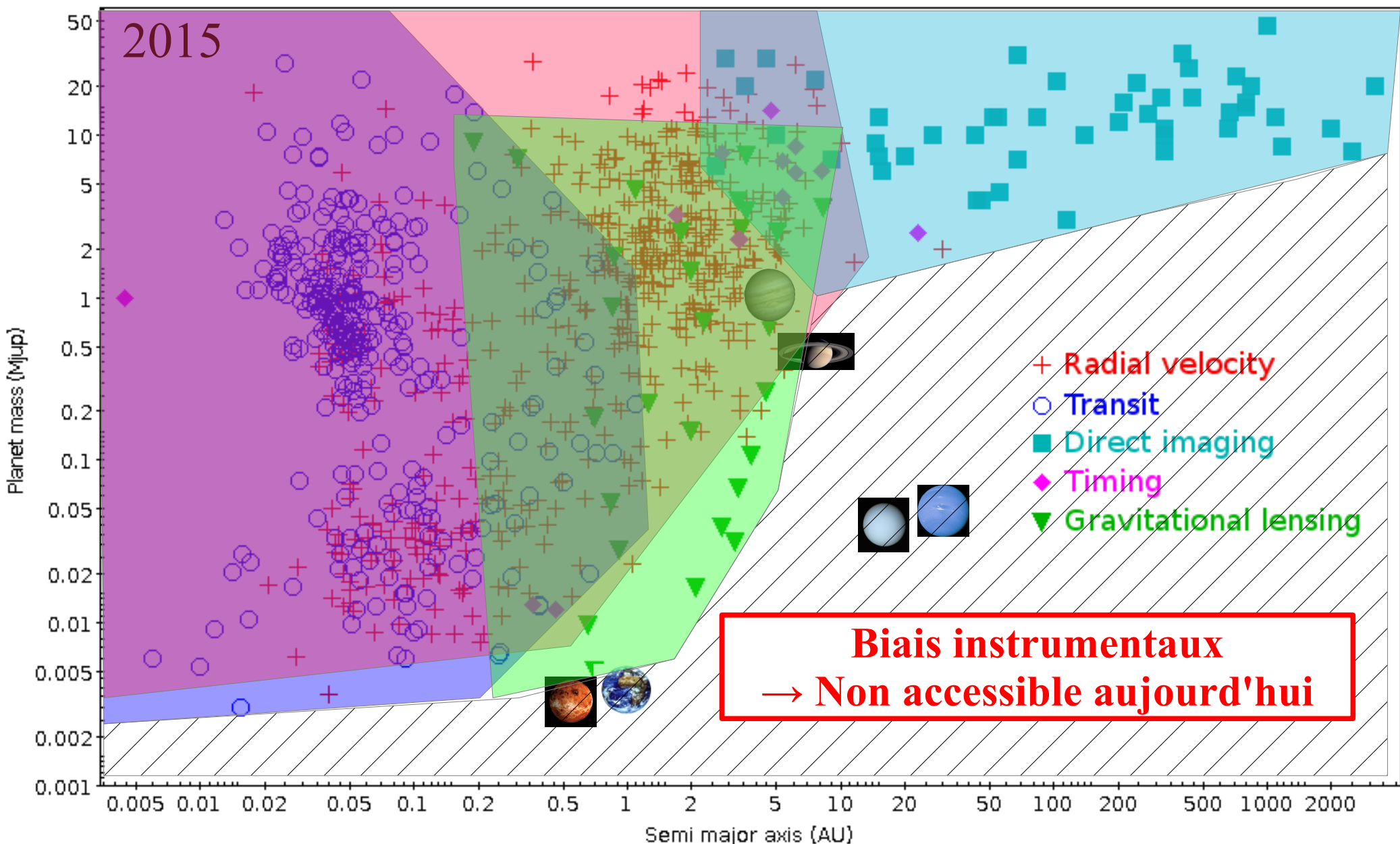


Diagramme demi-grand axe vs masse



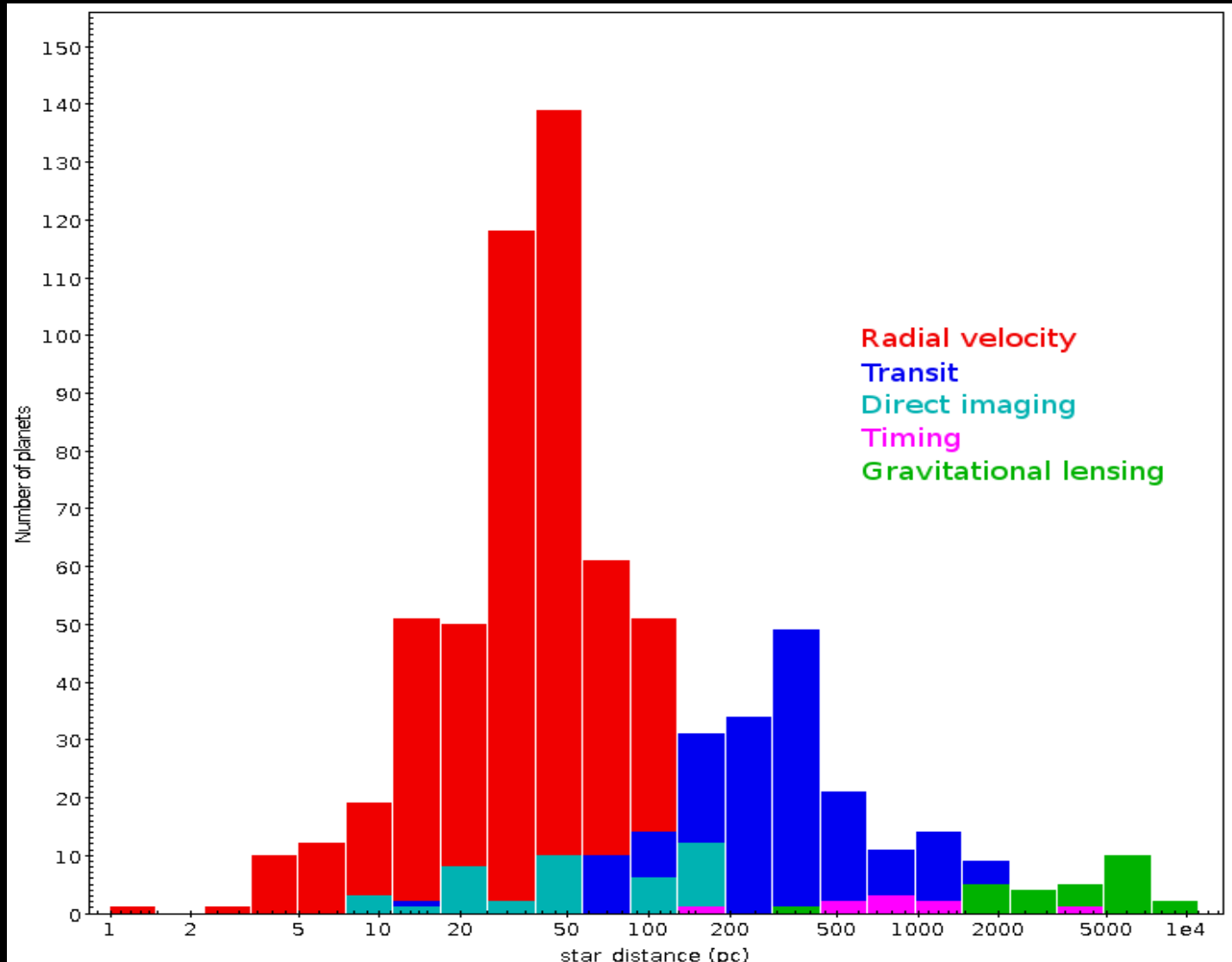
On ouvre une parenthèse

Complémentarité des techniques (1/4)



Complémentarité des techniques (2/4)

Distance des systèmes découverts

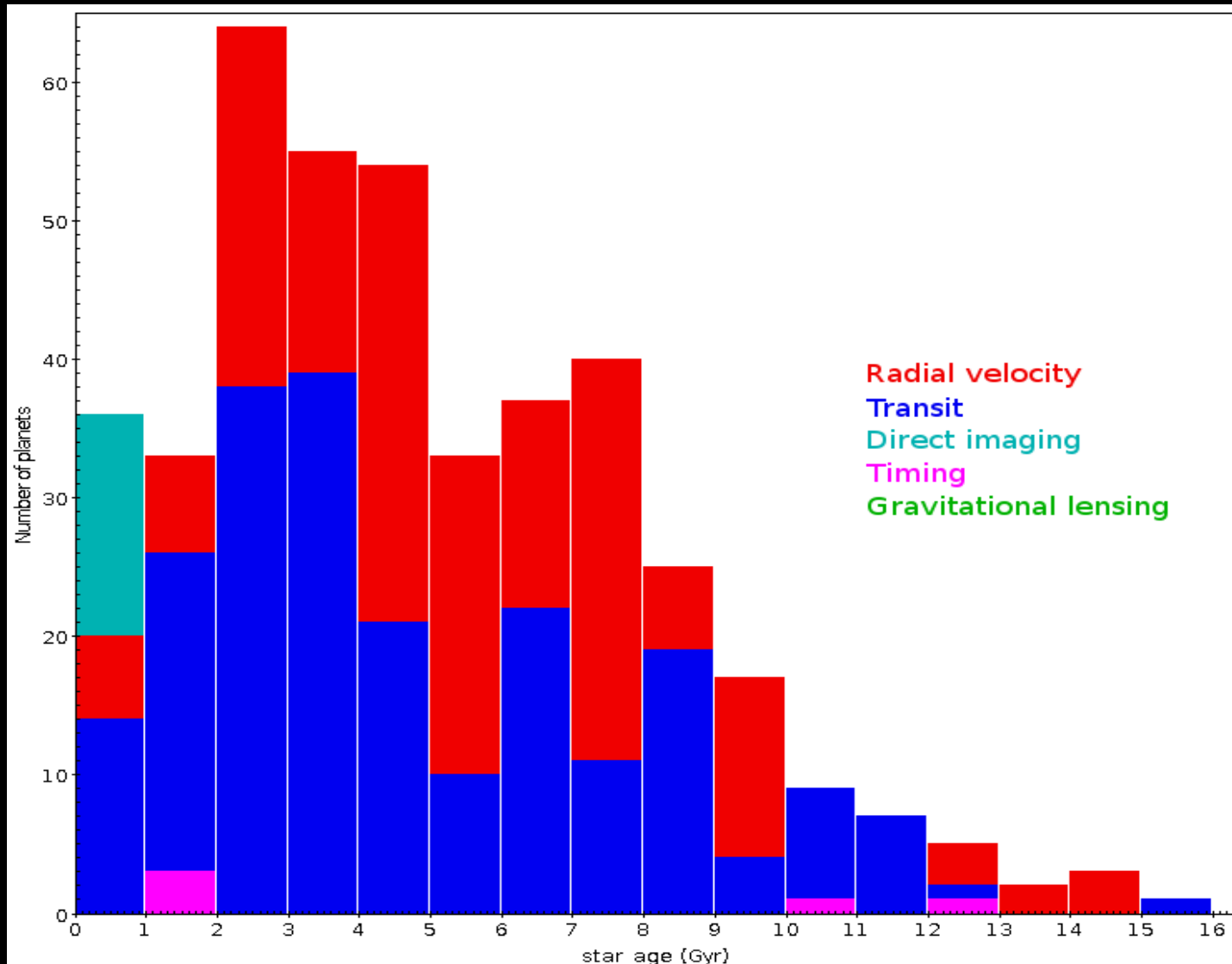


Diamètre de La
Galaxie $\sim 30\text{kpc}$

On observe proche
de notre Soleil

Complémentarité des techniques (3/4)

Âge des systèmes découverts



Âge peut être
difficile à
déterminer

=>

Grandes incertitudes

Complémentarité des techniques (4/4)

Pour avoir un échantillon complet:

Âge, type, distance de l'étoile

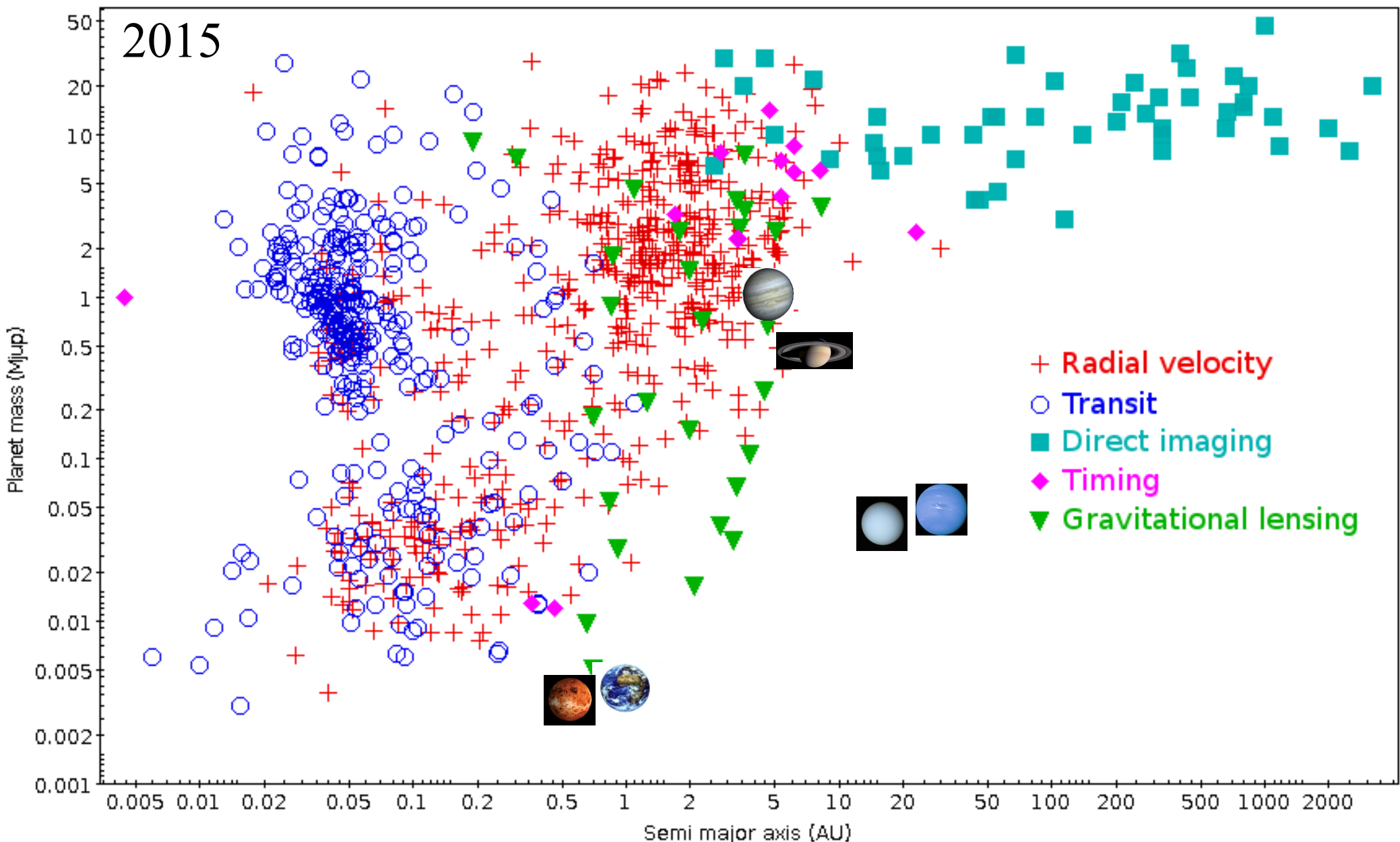
Tous types d'exoplanètes
(massives, légères, proches/loin de l'étoile, ...)

Un maximum de paramètres
(masse, rayon, excentricité, spectres, ...)

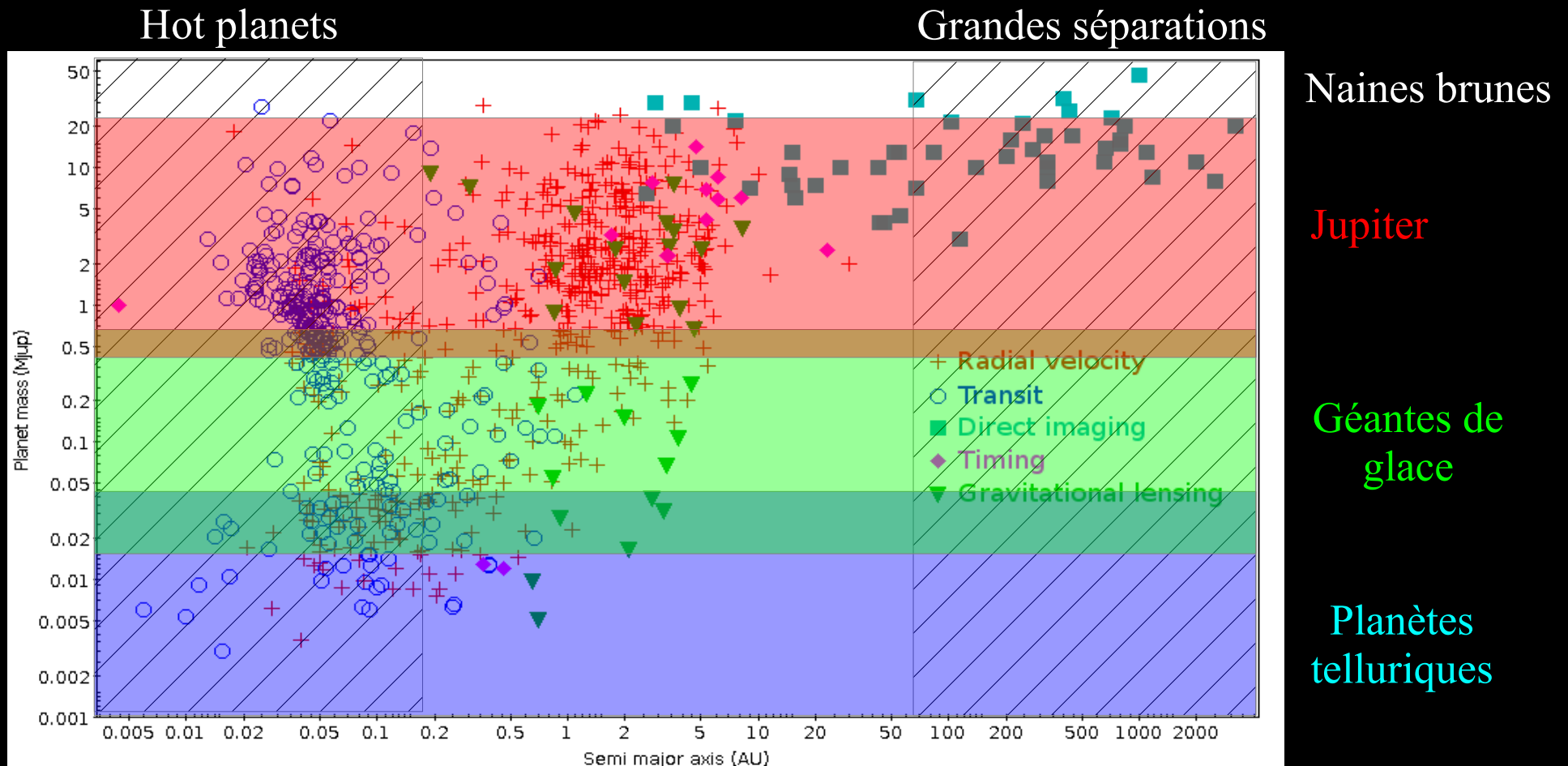
Il faut utiliser toutes les techniques

On ferme la parenthèse

Diagramme demi-grand axe vs masse



Les différents types de planètes



→ Comment se forment-elles ?
→ Plusieurs modes de formation ?

"Beaucoup" d'exoplanètes



→ quelle est la fréquence (nb de planètes/étoile) ?

Fréquence des exoplanètes

$0,3 < M \sin i / M_{\text{Jup}} < 10$ $2 < P/\text{jour} < 2e3$ autour d'étoiles FGK

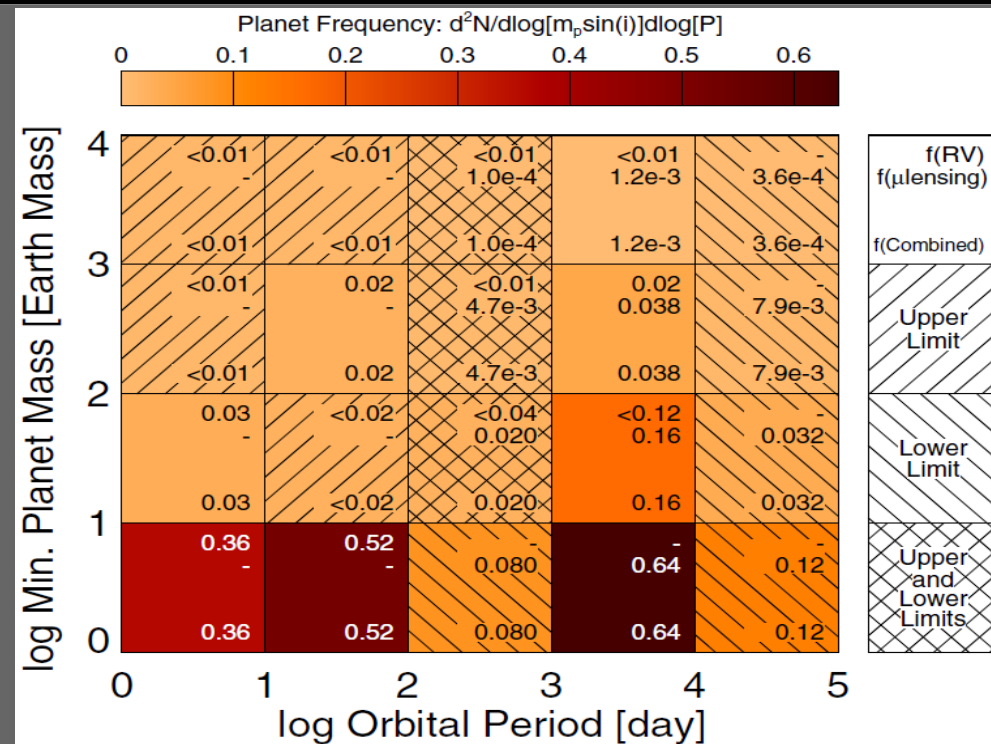
$$dN = C M^\alpha P^\beta d\ln M d\ln P \quad \text{avec } \alpha = -0,31 \pm 0,2 \quad \text{et} \quad \beta = 0,26 \pm 0,1$$

$dN = N_b$ planètes; M =masse; P =période orbitale; C =constante

Cumming et al 2008

$0,1 < M \sin i / M_{\text{Jup}} < 30$
 $1 < P/\text{jour} < 1e5$
 autour d'étoiles FGK

Clanton et al 2014



Fréquence des planètes dépend du type de l'étoile !

→ modèles de formation ?

Fréquence des exoplanètes

$0,3 < M \sin i / M_{\text{Jup}} < 10$ $2 < P/\text{jour} < 2e3$ autour d'étoiles FGK

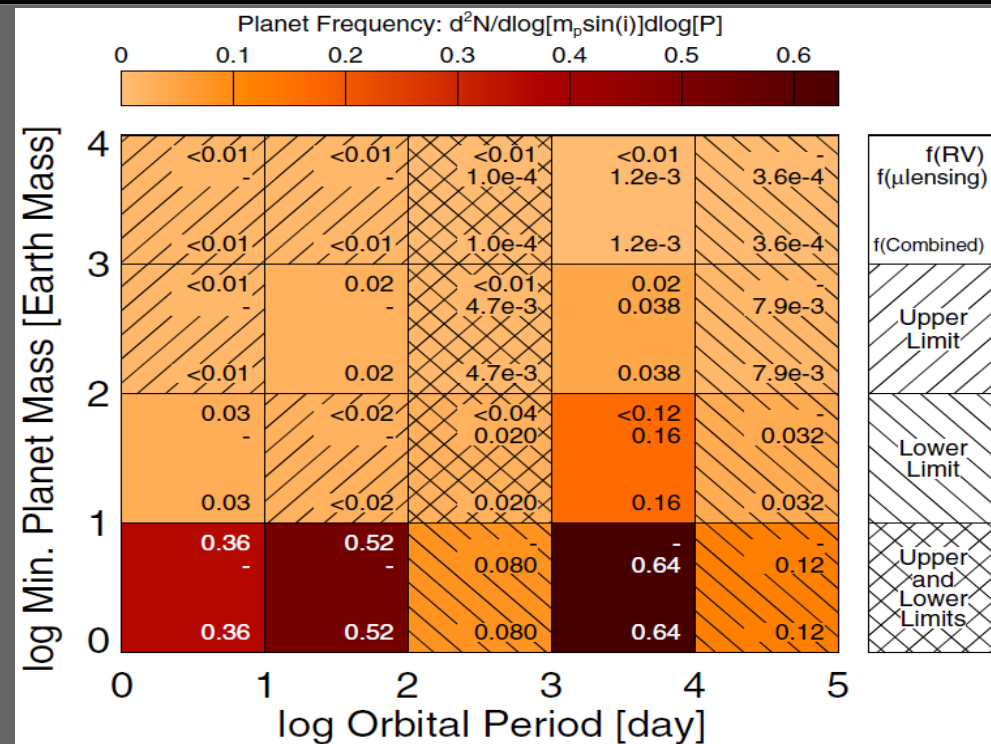
$$dN = C M^\alpha P^\beta d\ln M d\ln P \quad \text{avec } \alpha = -0,31 \pm 0,2 \quad \text{et} \quad \beta = 0,26 \pm 0,1$$

dN = Nb planètes; M =masse; P =période orbitale; C =constante

Cumming et al 2008

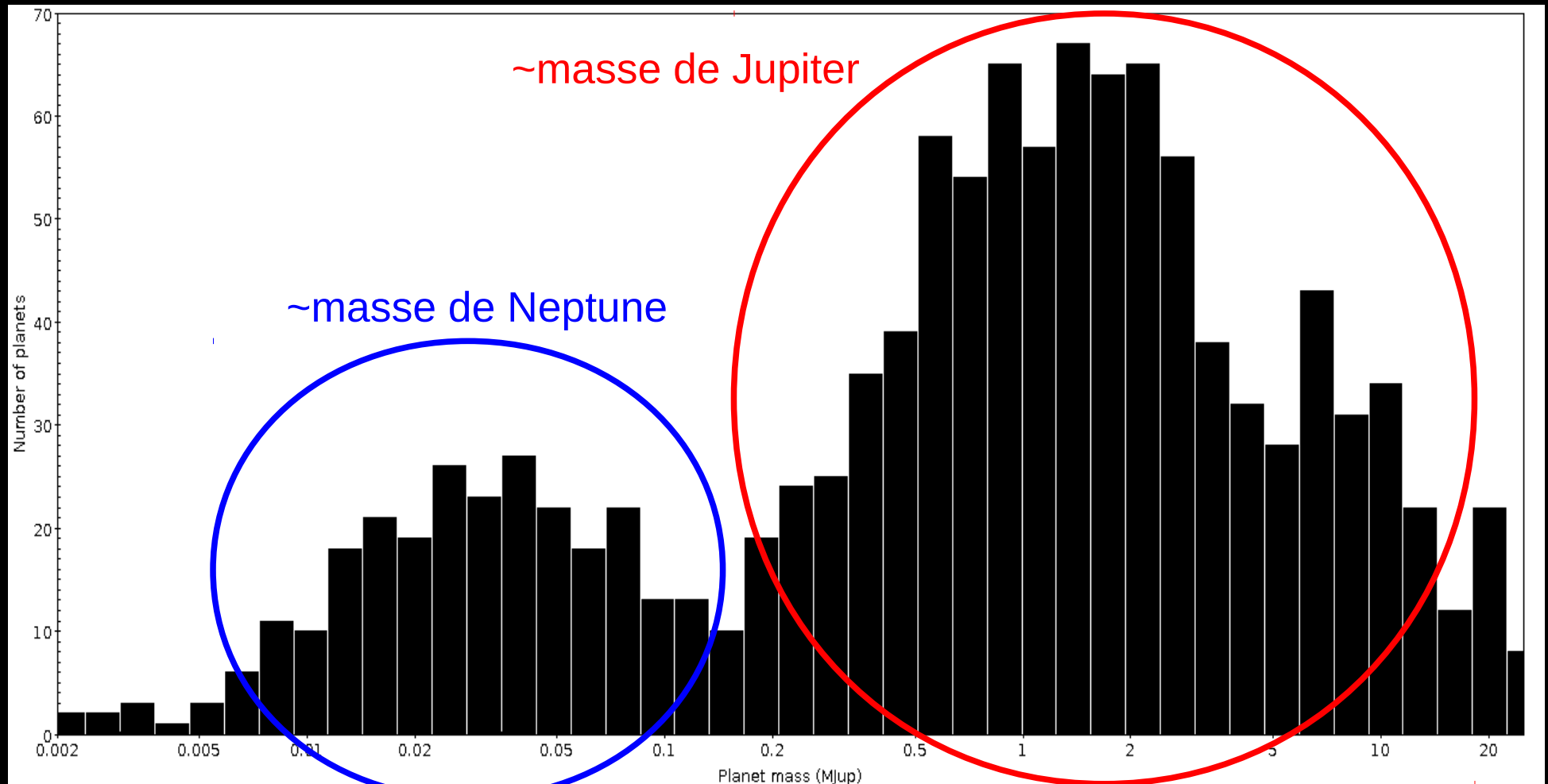
$0,1 < M \sin i / M_{\text{Jup}} < 30$
 $1 < P/\text{jour} < 1e5$
 autour d'étoiles FGK

Clanton et al 2014



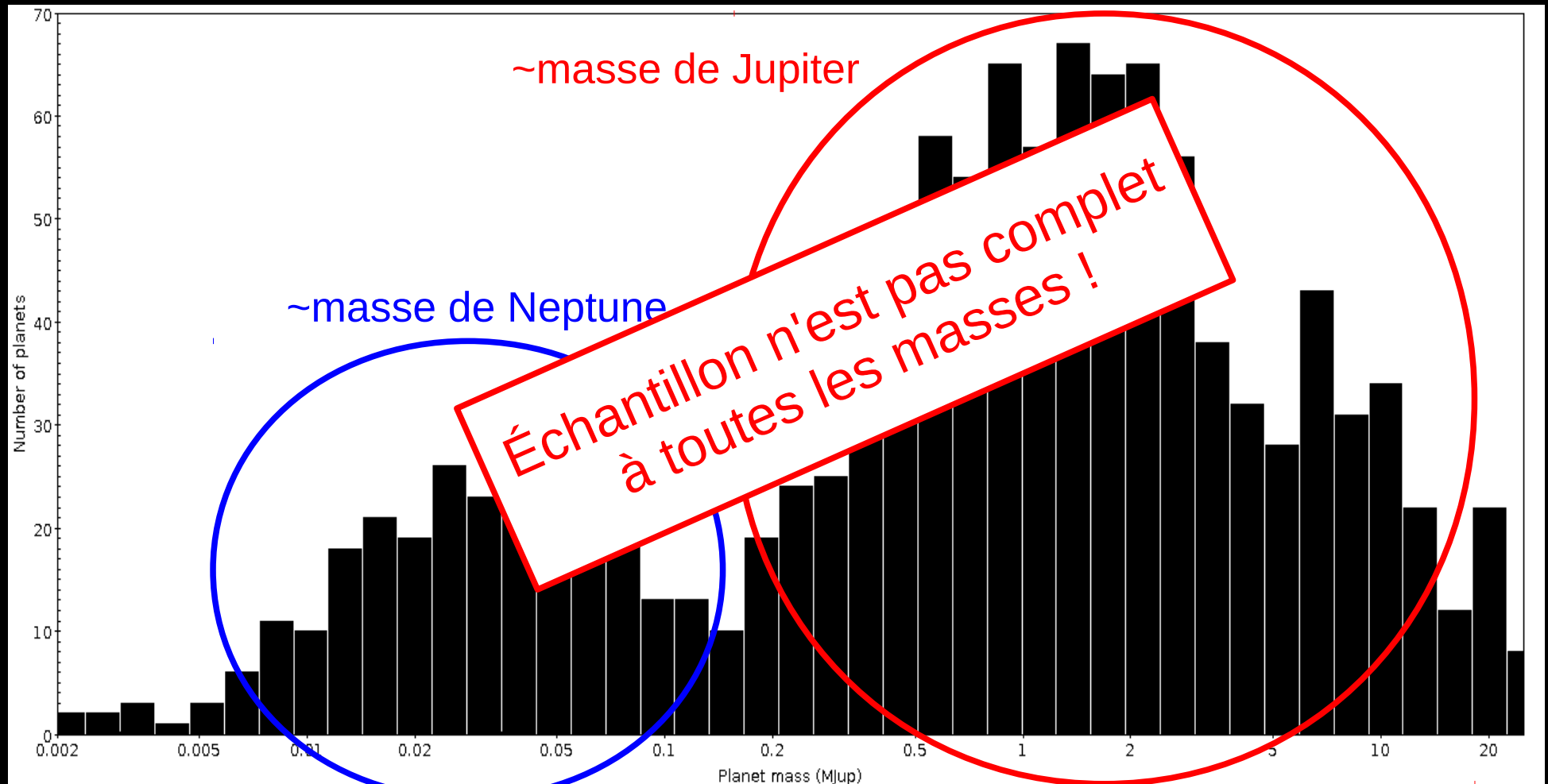
Planètes telluriques ? Grandes séparations? → Nouvelles observations

Distribution bimodale des masses



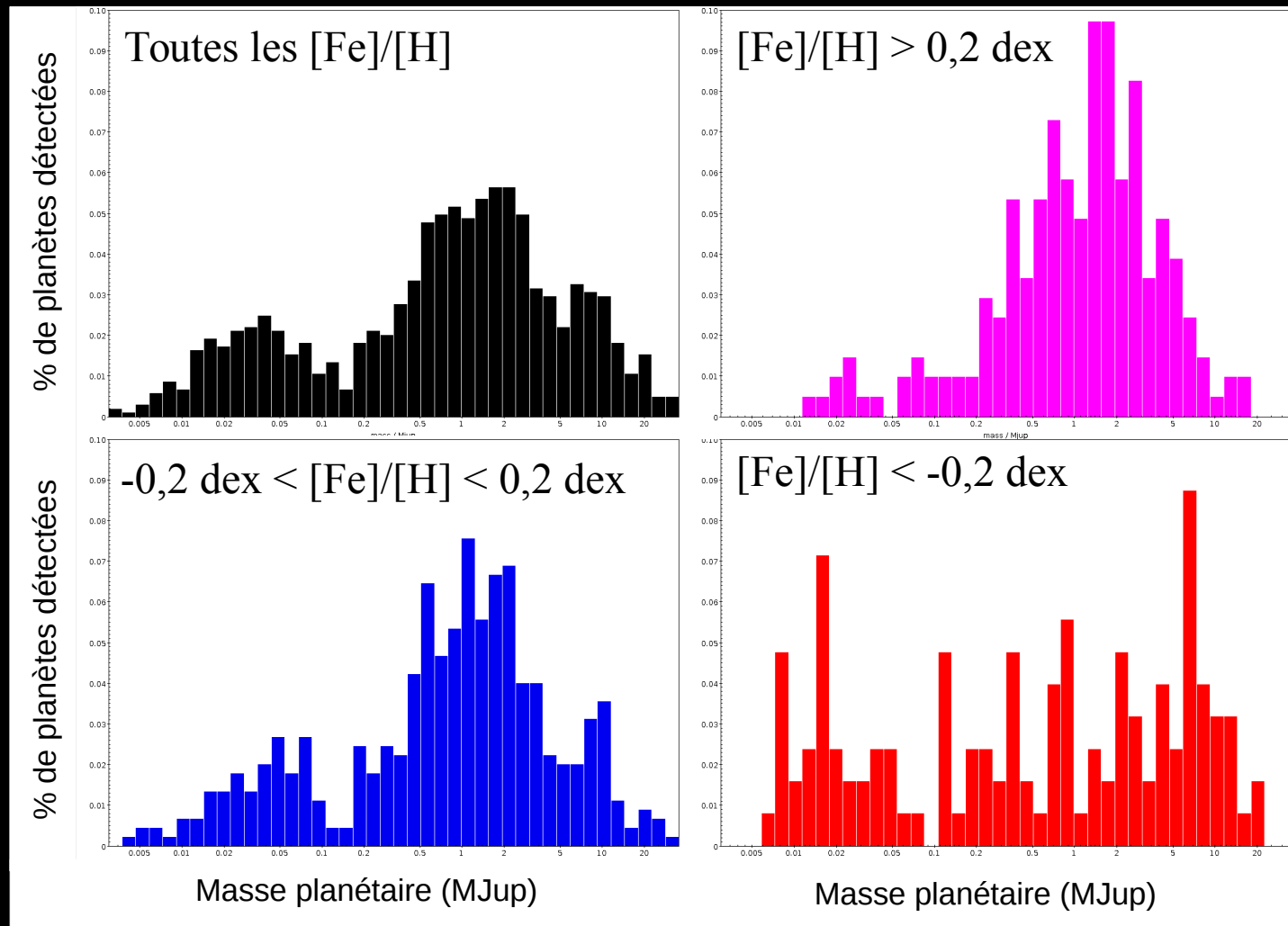
→ modèles de formation différents ?

Distribution bimodale des masses



→ modèles de formation différents ?

Distribution des masses et métallicité

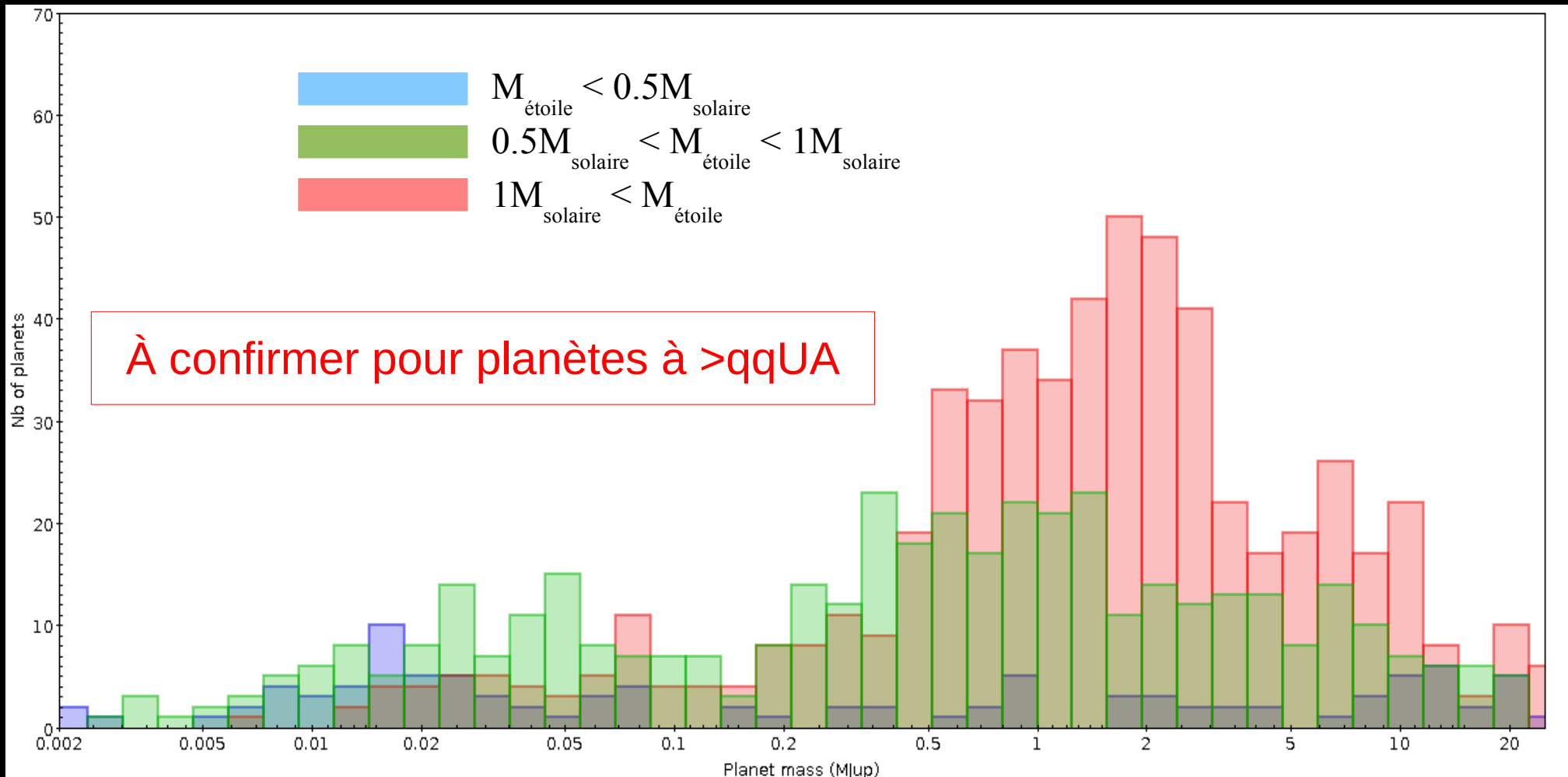


Plus de planètes massives autour des étoiles métalliques

→ Modèles de formation ?

À confirmer pour
planètes à $> 100 M_{Earth}$

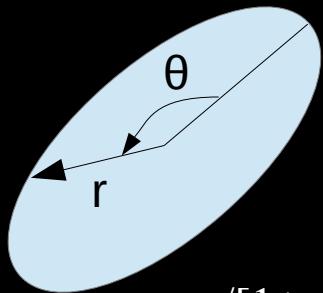
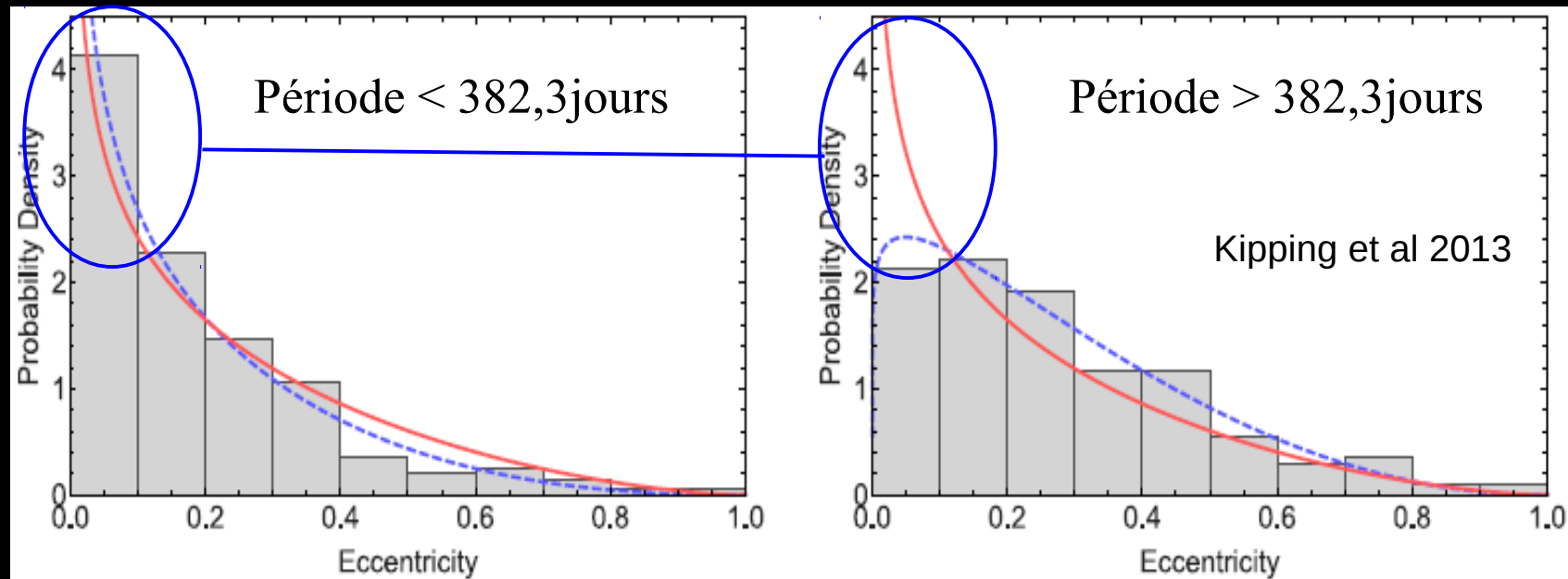
Distribution des masses et masse stellaire



Plus de planètes massives autour des étoiles massives

→ Modèles de formation ?

Histogramme des excentricités



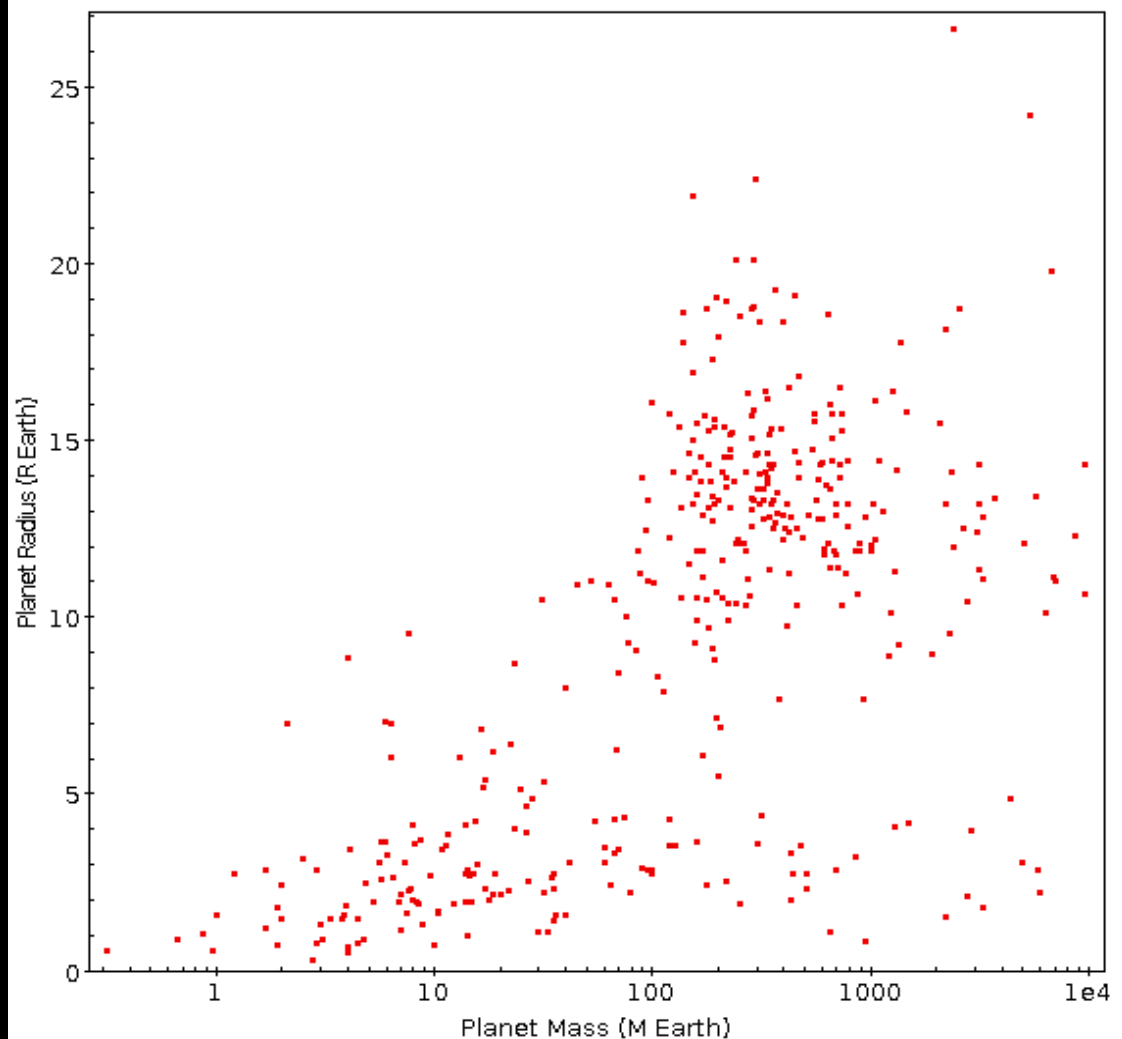
$$r = p/[1+e \cos(\theta)]$$

Planètes proches de l'étoile → orbites circulaires

→ modèles de formation ?

Circularisation des orbites

Diagramme masse vs rayon

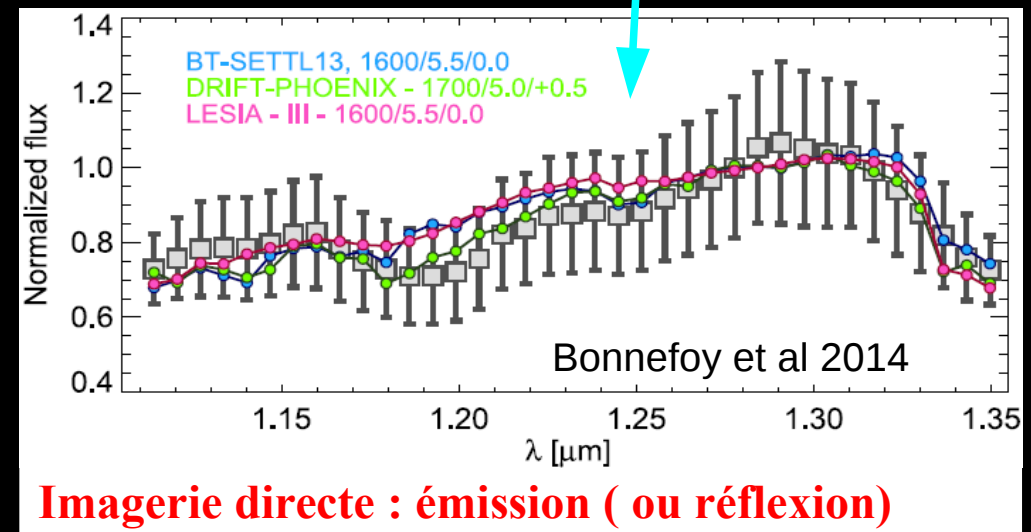
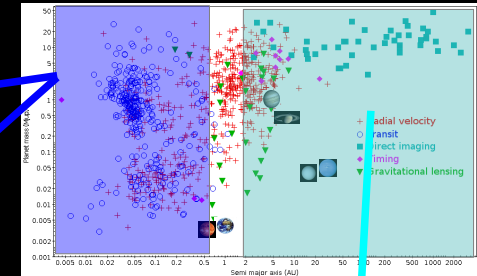
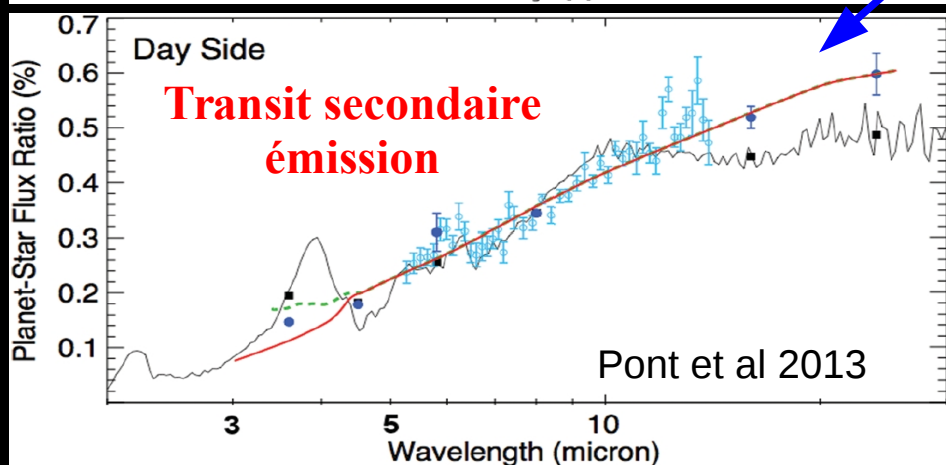
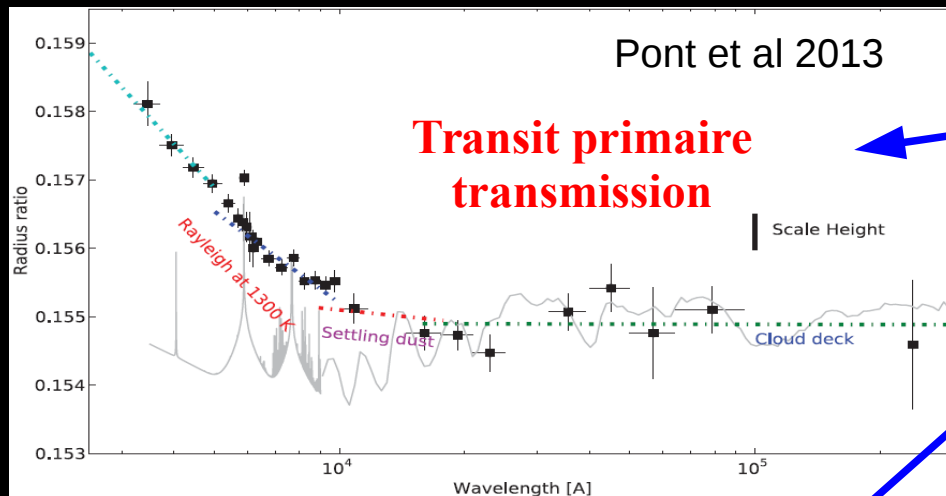


Échantillon non complet

Accès à la densité

→ Modèles de structure interne et de formation

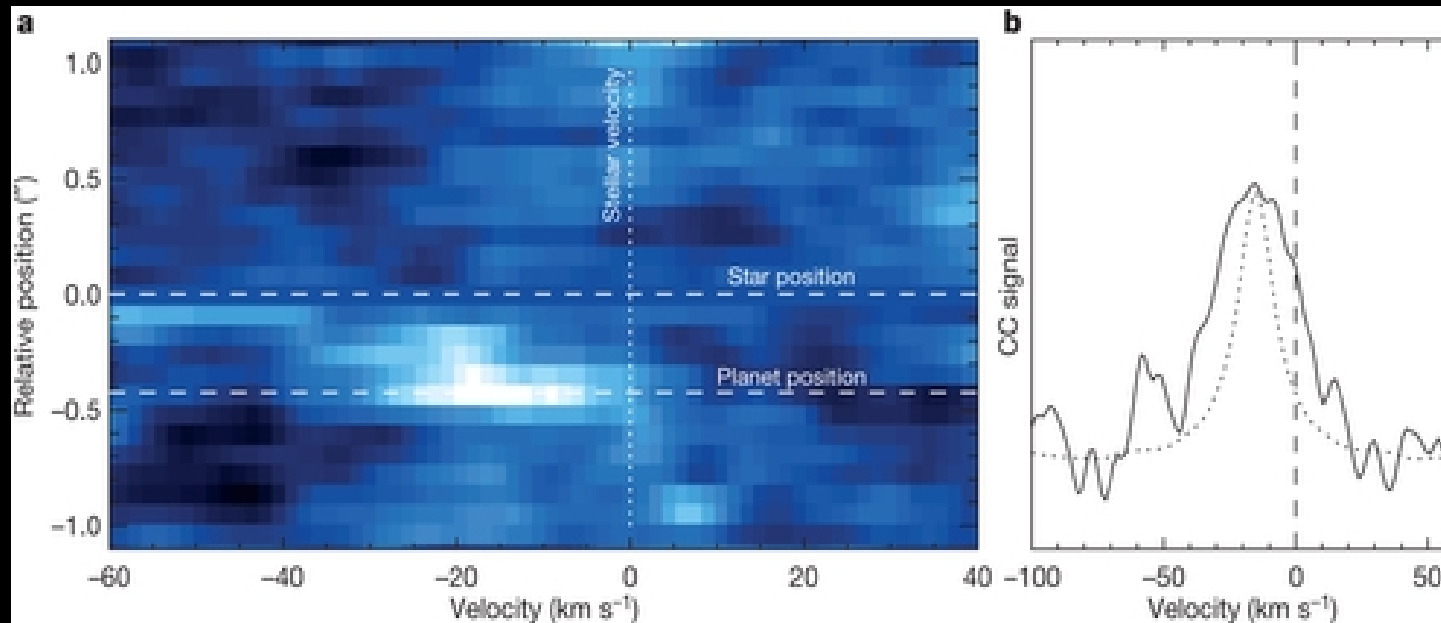
spectres d'exoplanètes



Composition chimique, variation journalière/saisonnière, nuages, etc
 → Modèles d'atmosphères

Vitesse de rotation planétaire

Vitesse radiale avec raie d'absorption de CO
Snellen et al 2014



Blue/red shift: planète s'éloigne plus ou moins vite de la Terre que son étoile hôte ?

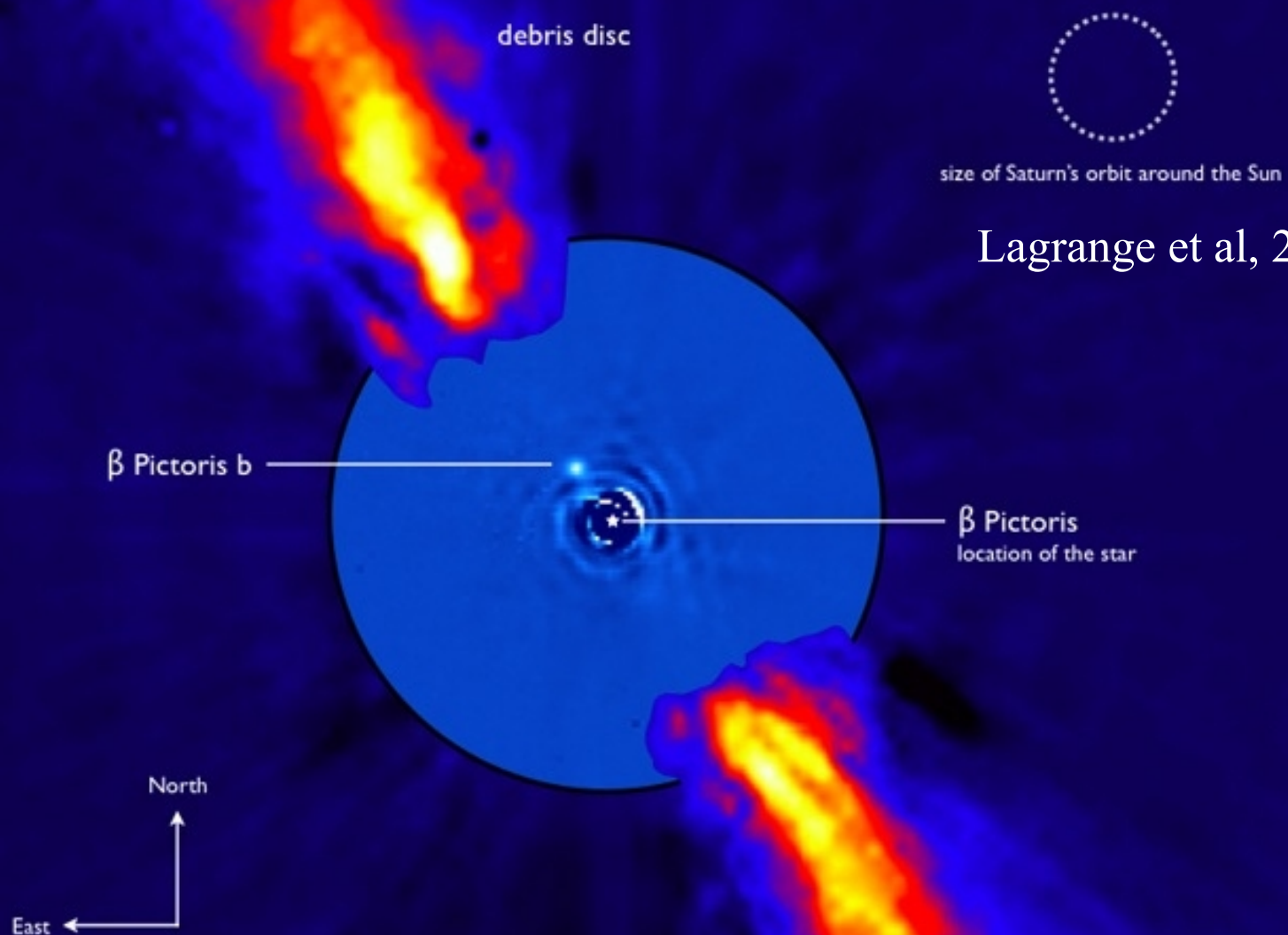
→ vitesse orbitale de la planète (mouvement annuel)

Élargissement: planète tourne sur elle-même

→ vitesse de rotation propre (mouvement diurne)

→ Contraintes sur l'orbite

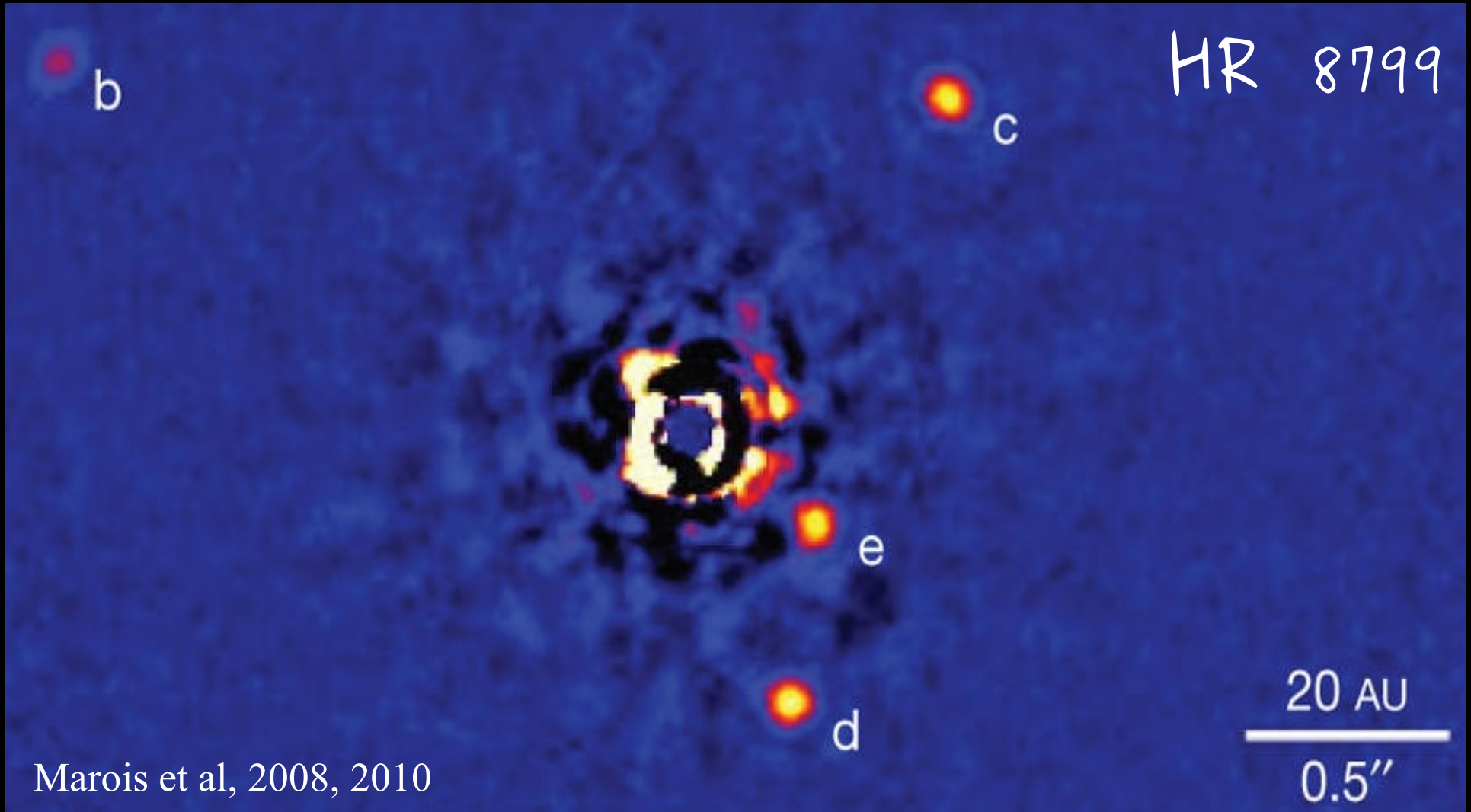
Planètes et disques (1/3)



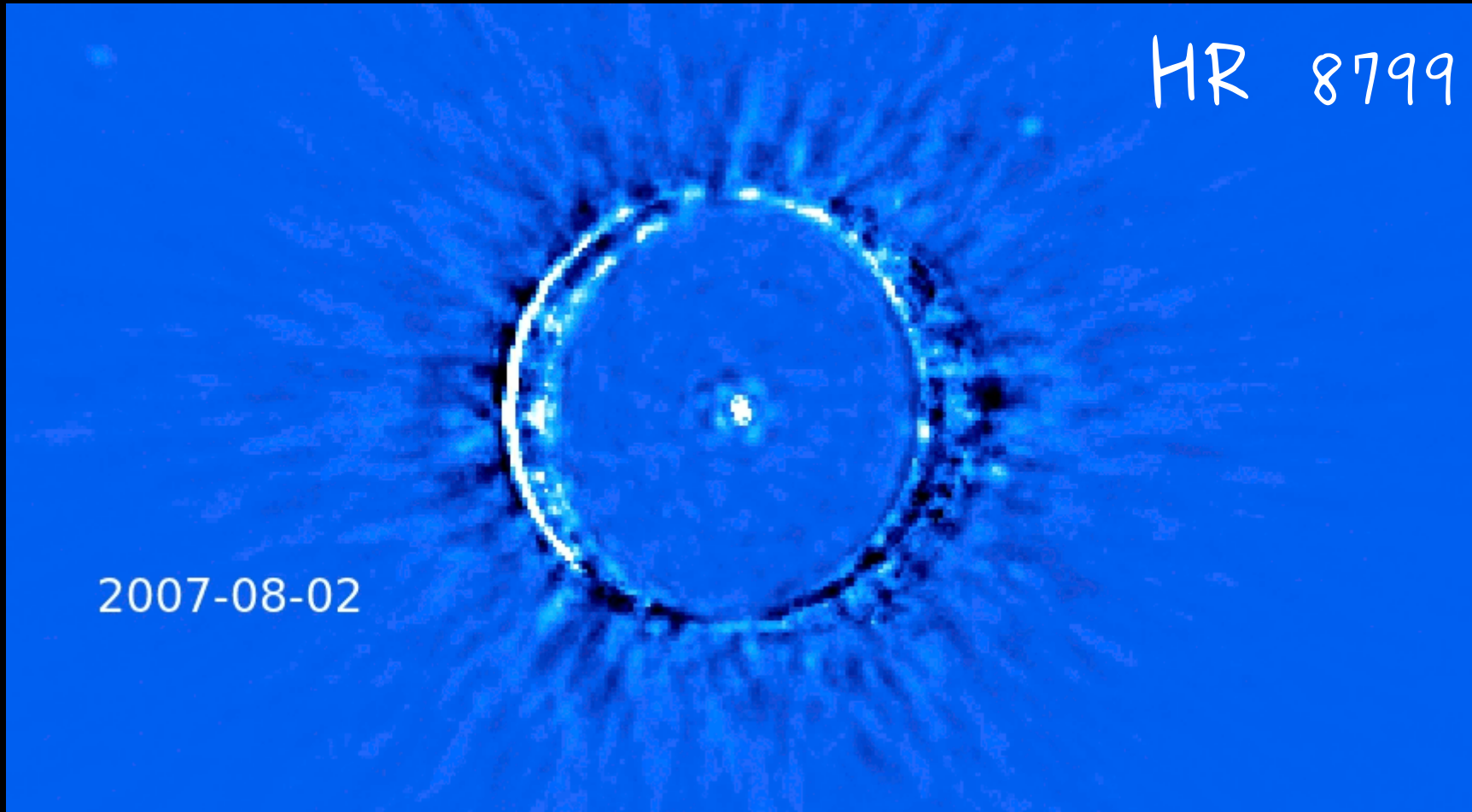
Lagrange et al, 2009

Planète dans le plan du disque
→ Formation dans un disque

Planètes et disques (2/3)



Planètes et disques (3/3)



4 planètes orbitant dans le même plan
→ Formation dans un disque

Disques circumstellaires

Disques circumstellaires

Observations Sub mm $\rightarrow$ 25-50% des étoiles jeunes ont un disque
Visible/IR $\rightarrow$ quelques images disques de ~ 100 UA (mais compliquées à obtenir)

Disques protoplanétaires

- Gaz (domine la masse) + poussières primordiales
- $\sim < 10^7$ ans (ex Ttauri)
- Assez massifs (fraction de masse solaire)
- Optiquement épais
- Dynamique : hydrodynamique et transfert du rayonnement

Disques de débris

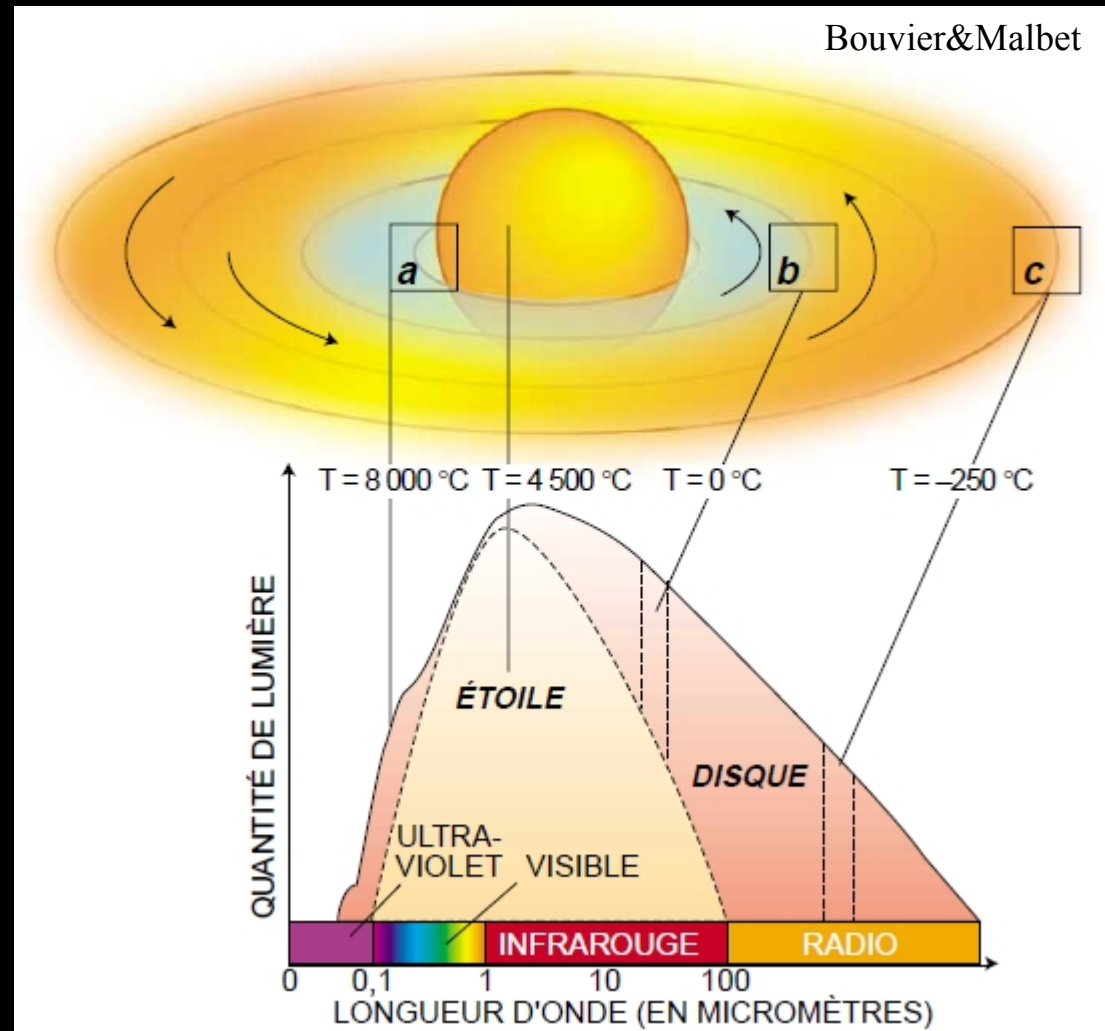
- Poussières non primordiales + planétésimaux + très peu de gaz
- $\sim > 10^7$ ans
- Très peu massifs (poussières observées $\ll$ masse Terre)
- Optiquement mince
- Dynamique : gravitation

Disques protoplanétaires (proplyds)

Disque domine le spectre dans
UV et MIR à Radio

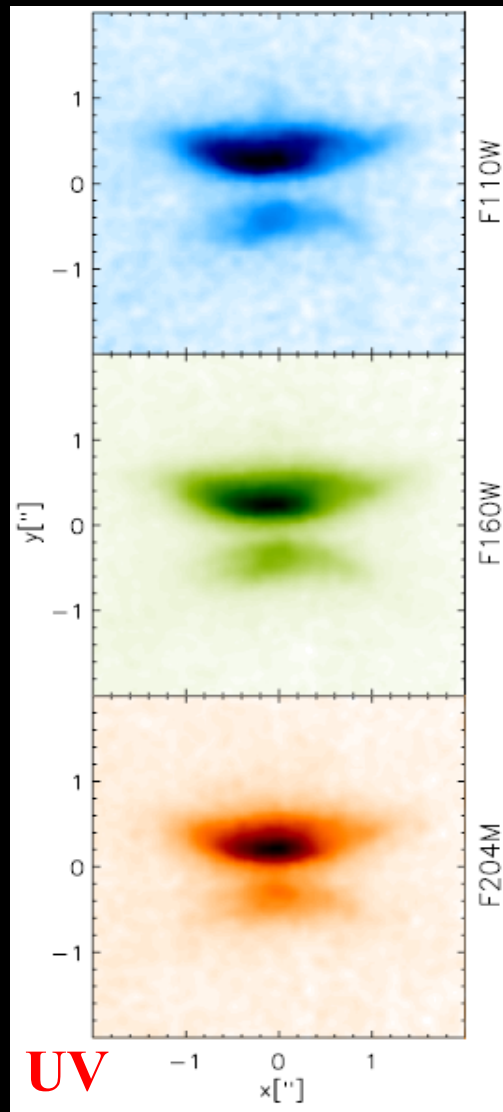
Gaz : émission/absorption
(10 - 100 μ m)

Chaque domaine spectral correspond
à une région du disque

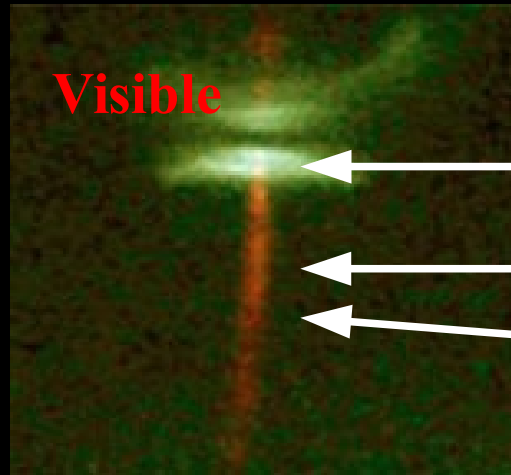


Disques protoplanétaires : un exemple

HH30/HL Tau



Madlener et al 2012

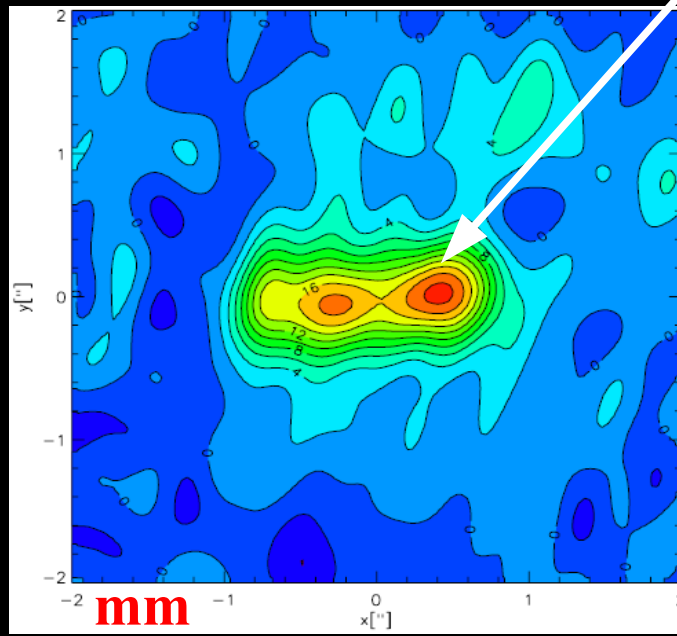


Jet des pôles de l'étoile

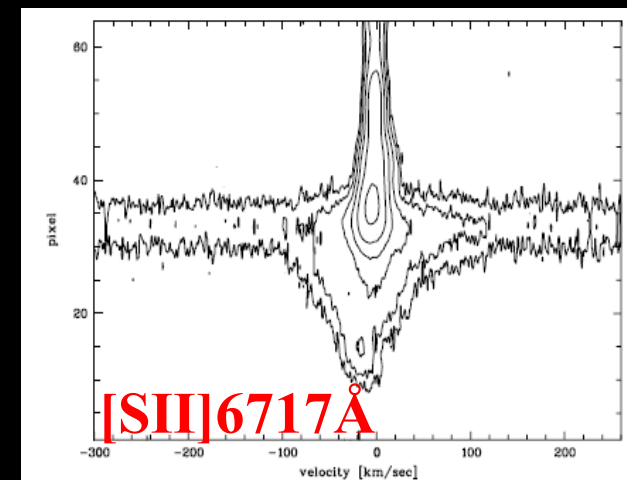
Poussières diffusent

Poussières masquent centre

Poussières émettent



Appenzeller et al 2005



Disques de débris : poussières

Masse dominée par poussières (i.e. peu de gaz)

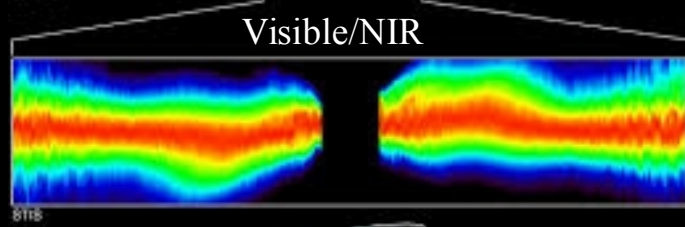
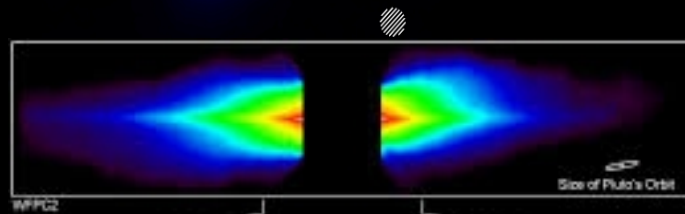
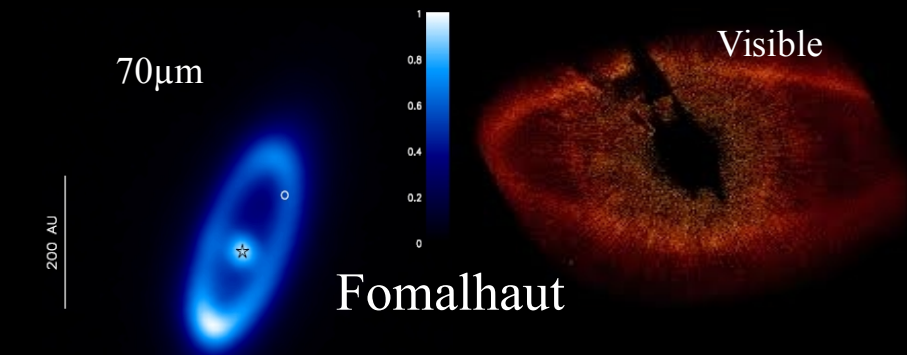
Une poussière subit :

- Attraction étoile
- Pression de radiation $\rightarrow$ grains $\leq 0.1 \mu\text{m}$ chassés du système
- Effet Poynting-Robertson $\rightarrow$ grains $> 0.1 \mu\text{m}$ tombent sur étoile

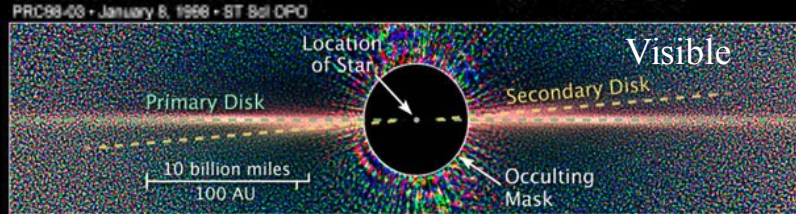
Durée de vie poussières $<$ âge étoile $\rightarrow$ poussières régénérées
 $\rightarrow$ poussières non primordiales

Source = collisions, chutes sur étoile

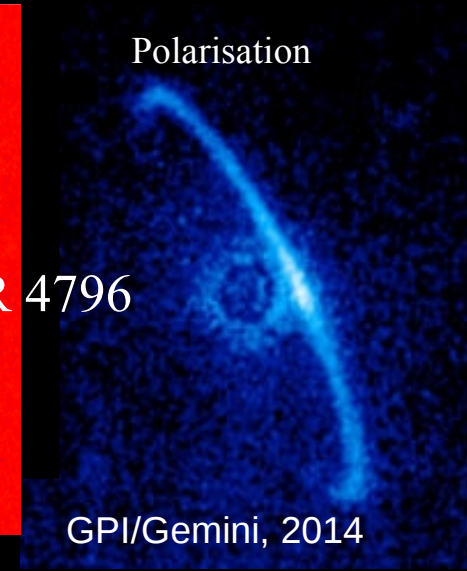
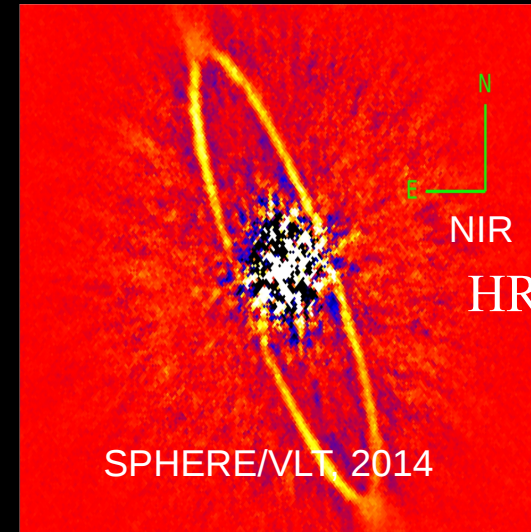
Disques de débris : NIR/Visible



Beta Pictoris
PRC99-03 • January 8, 1996 • ST ScI OPO

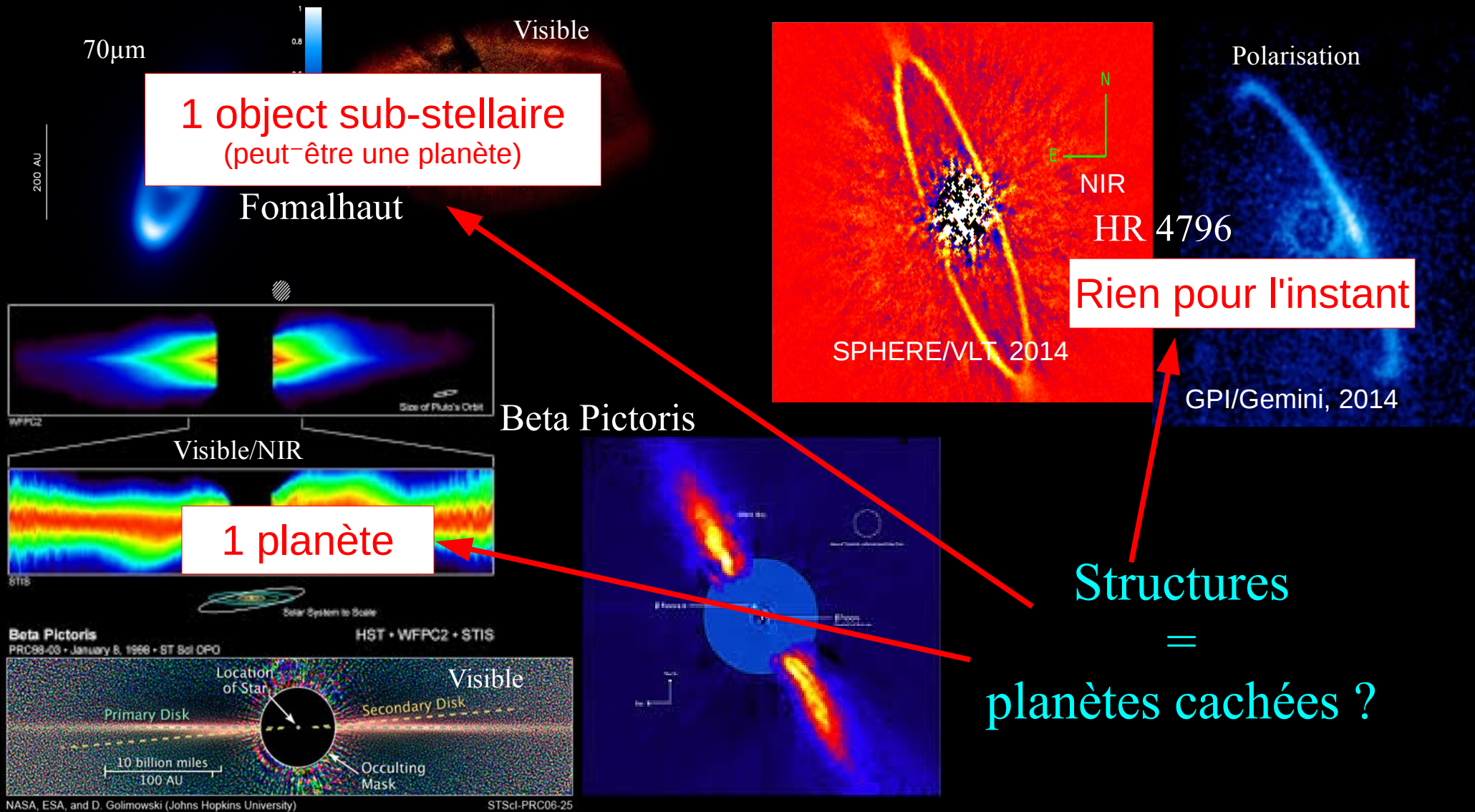


NASA, ESA, and D. Golimowski (Johns Hopkins University) STScI-PRC06-25



Structures
=
planètes cachées ?

Disques de débris : NIR/Visible



Modèles de formation

Planètes telluriques

Accrétion

Revue par Terquem 2005 (école de Goutelas)

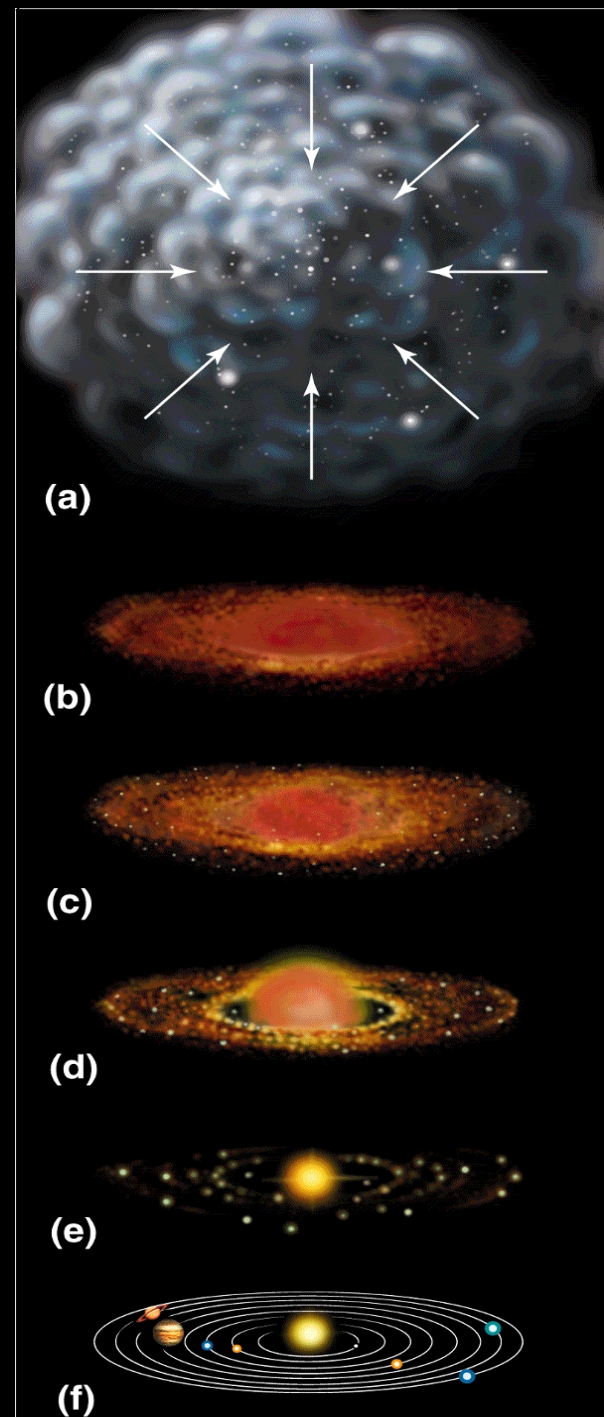
Formation par accrétion

Effondrement du nuage: formation étoile

Sédimentation et
Agglomération ($\mu\text{m} \rightarrow \text{m}$)

Particules de $\sim 1\text{m}$ aux planétésimaux

Planétésimaux aux planètes



Étape 1 : formation de l'étoile

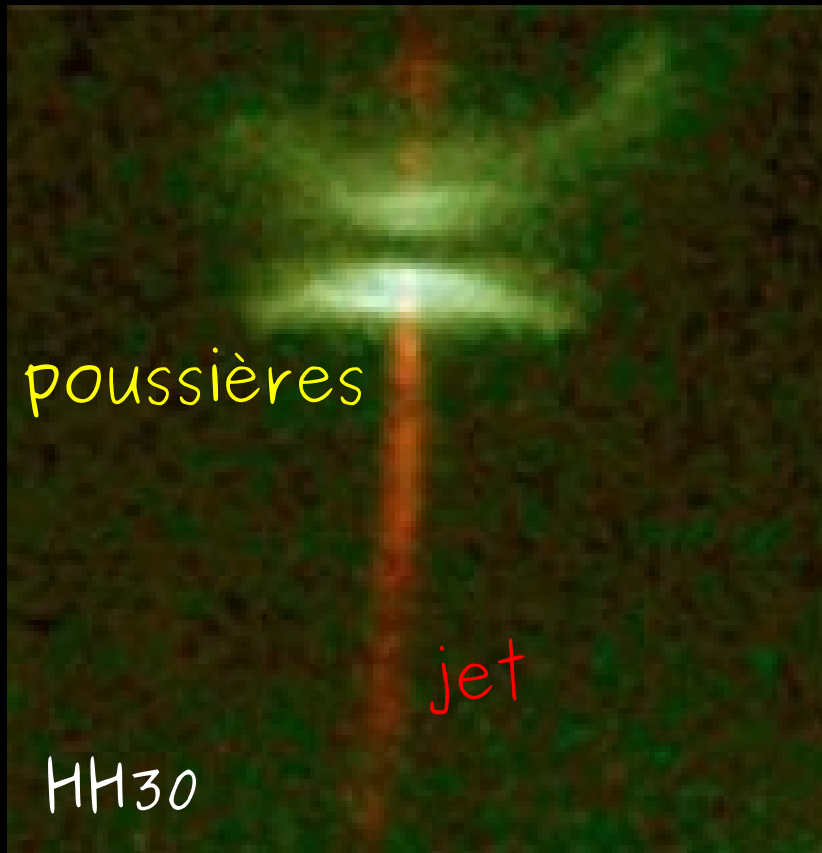


« Tête de cheval »

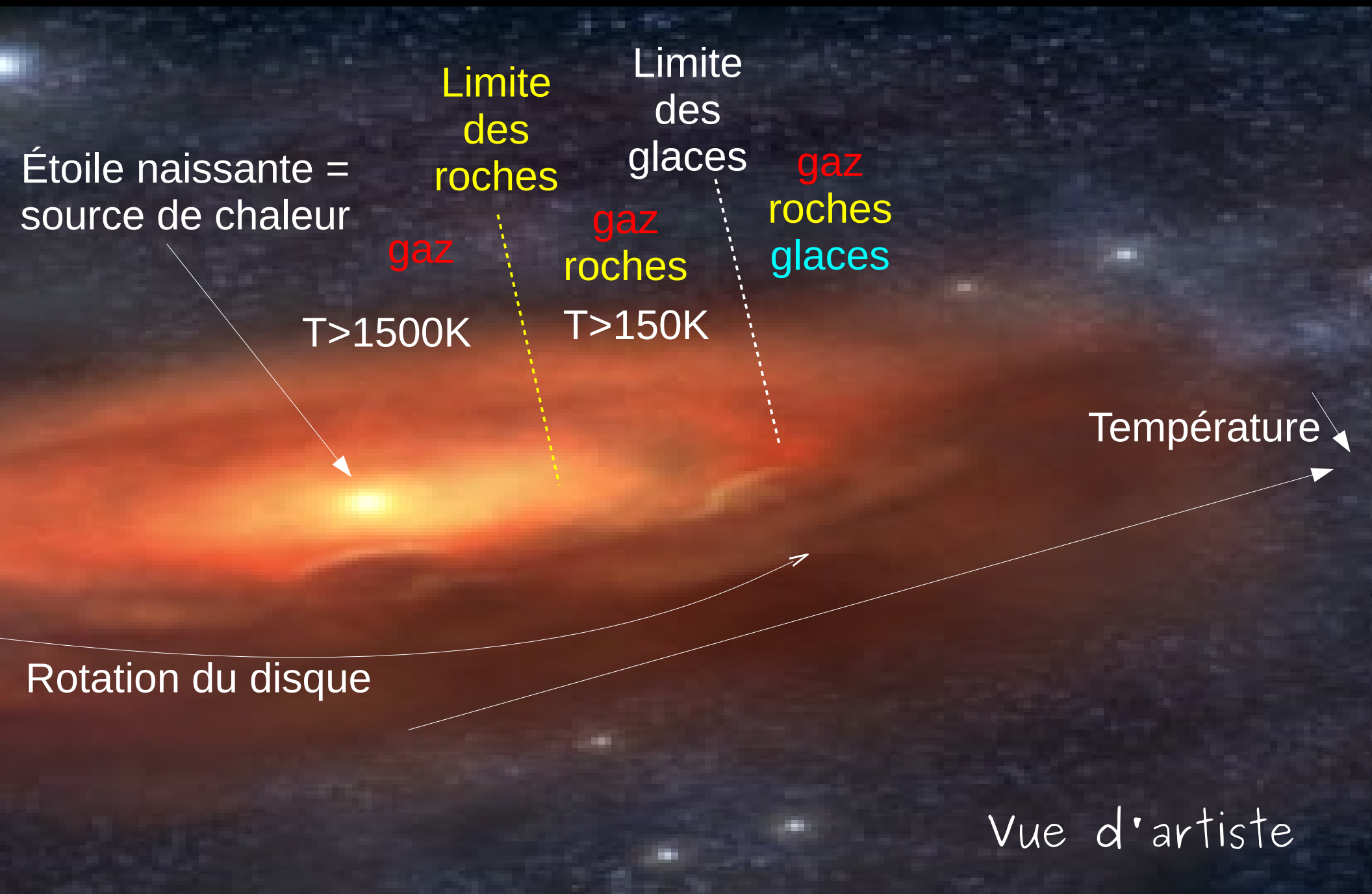
Étape 2 : disque protoplanétaire

Conservation du moment cinétique

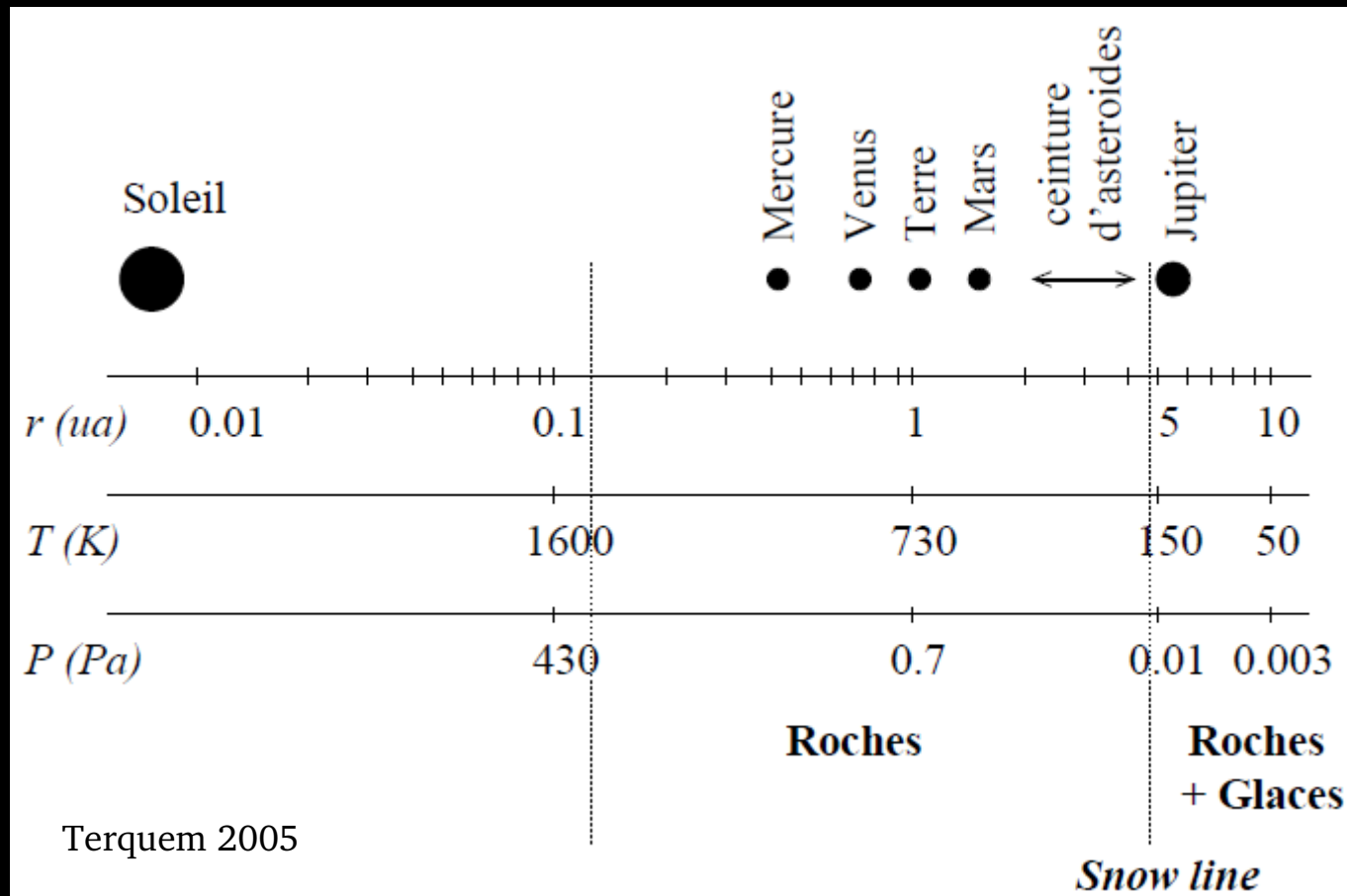
→ formation d'un disque de gaz et poussières (μm)



Modèle standard du disque protoplanétaire

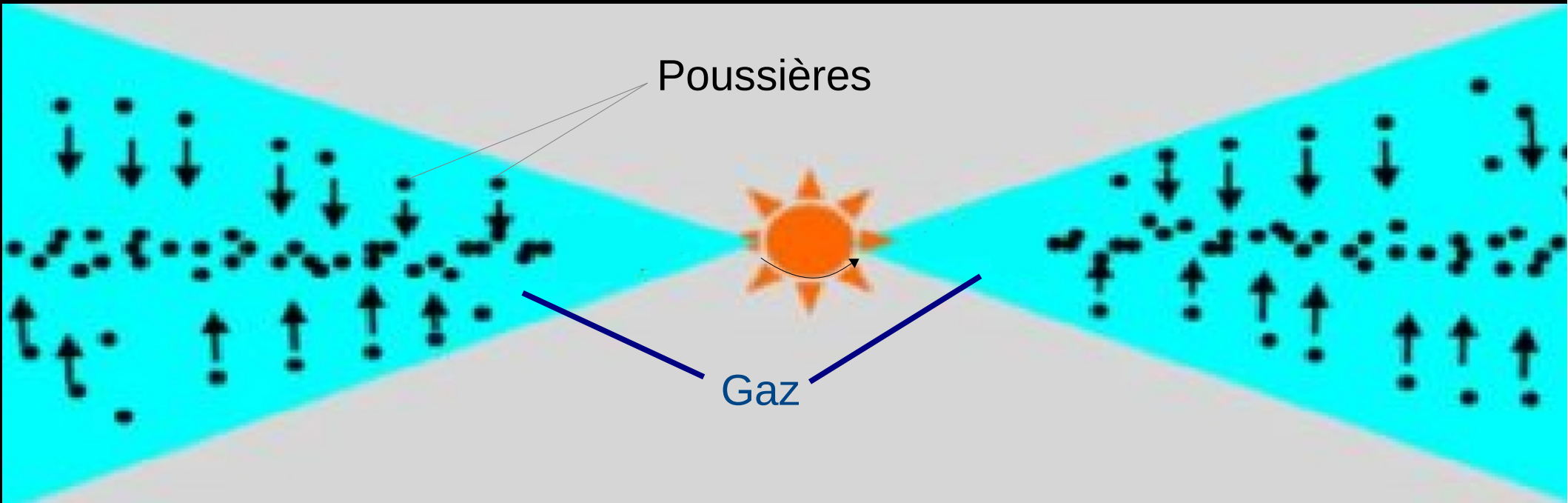


Modèle standard du disque protoplanétaire



Étape 3 (1/2) : sédimentation

Le gaz entraîne les poussières micrométriques



Petits grains sont plus affectés

- grandes vitesses relatives
- Nombreuses collisions

Étape 3 (2/2) : poussières μm à cm/m

Observations

- “Nos” astéroïdes : temps de formation ($\sim 10^6$ ans), diversité chimique, etc
- Rapport en masse poussières/gaz du milieu interstellaire
- Disques protoplanétaires
- Etc

Plusieurs modèles

- **Instabilités gravitationnelles** (Safronov 1969)
- **Coagulation** (Okuzumi et al 2012a)
- **Instabilité rotationnelle-magnétique** (Okuzumi et al 2012b)
- Etc.

Difficultés:

- Dérive des particules vers l'étoile à cause du gaz.
- Turbulence dans disque de gaz
- Masse initiale du disque (trop grande pour modèle d'instabilité gravitationnelle)
- Etc

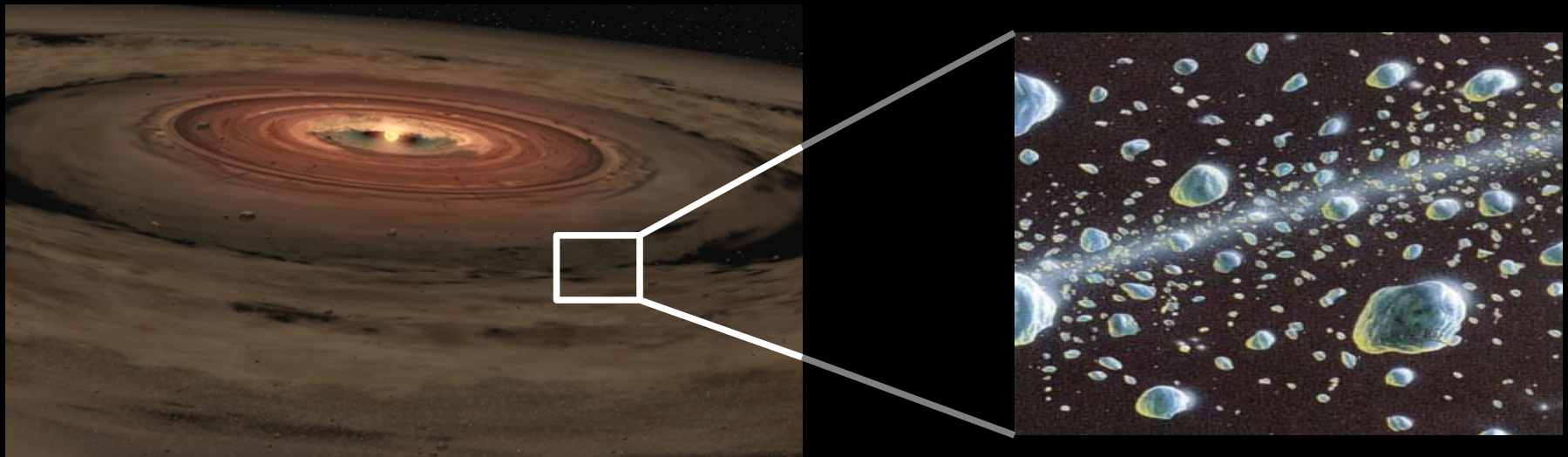
Étape 4 : formation des planétésimaux (0,1 – 1 km)

Particules de taille cm/m dérivent “vite” vers l'étoile

Plusieurs modèles

- Collisions et agglomération < 1000 ans ~ temps de dérive des particules vers l'étoile
- Sédimentation dans des “clumps” stables de poussières (Cuzzi et al 2008)
- Etc

Étape mal comprise



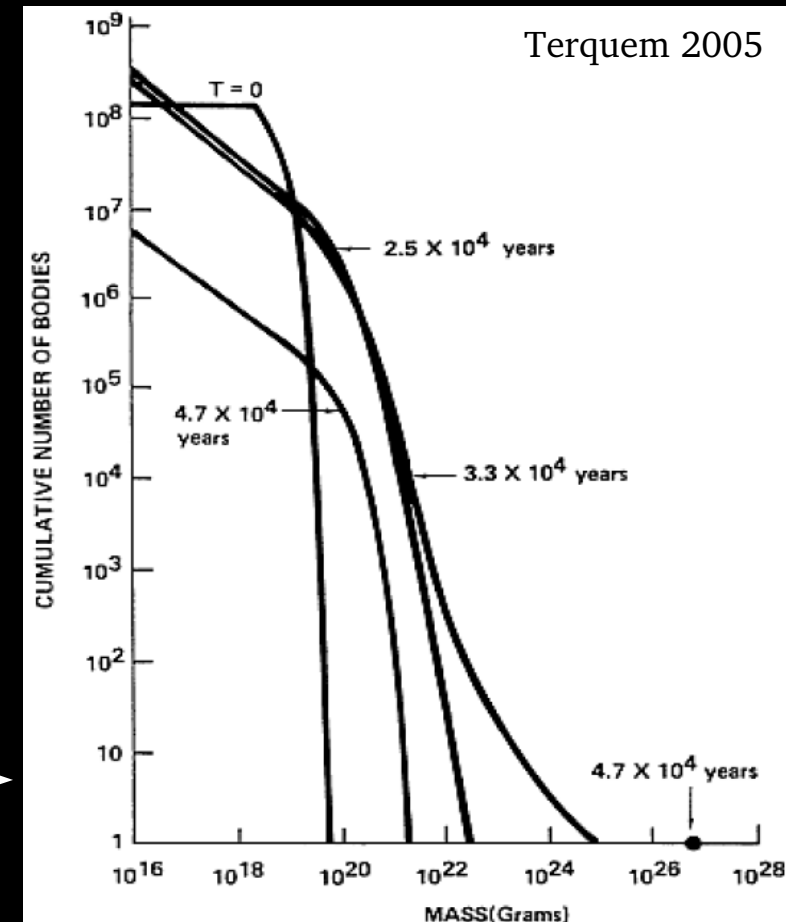
Vues d'artiste

Étape 5 : formation des protoplanètes

Interactions gravitationnelles locales + collisions
Fractions de $M_{\oplus}$ et plus de gaz en 10^4 - 10^5 ans

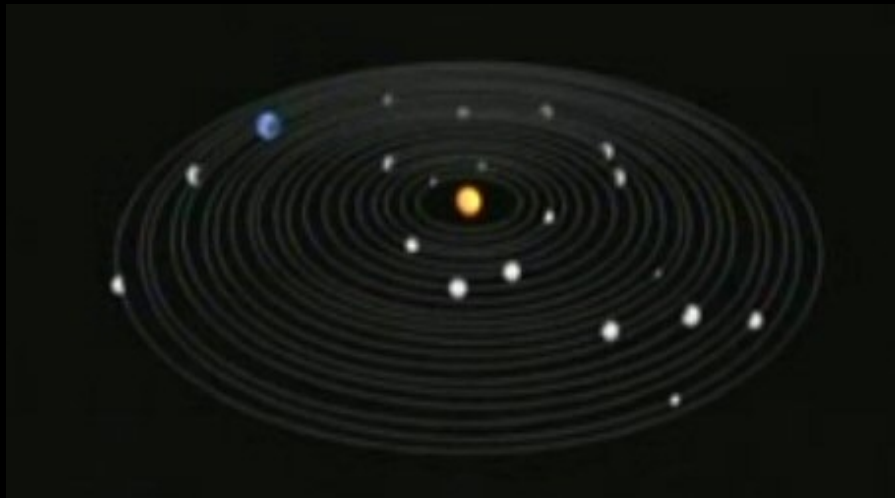
Modèles

- Impact du gaz négligeable → dérive négligeable
- Interaction gravitationnelles locales entre planétésimaux
→ excentricité moyenne augmente
- Collisions + fragmentation/agglomération :
 - Croissance simultanée de tous les planétésimaux
→ accréation oligarchique
→ évolution lente
 - Le plus gros croît au détriment des autres
→ accréation hiérarchique



Étape 6 : planètes telluriques

Interactions gravitationnelles
lointaines + collisions
< qq $M_{\oplus}$ en $\sim 10^8$ ans



Vues d'artiste

