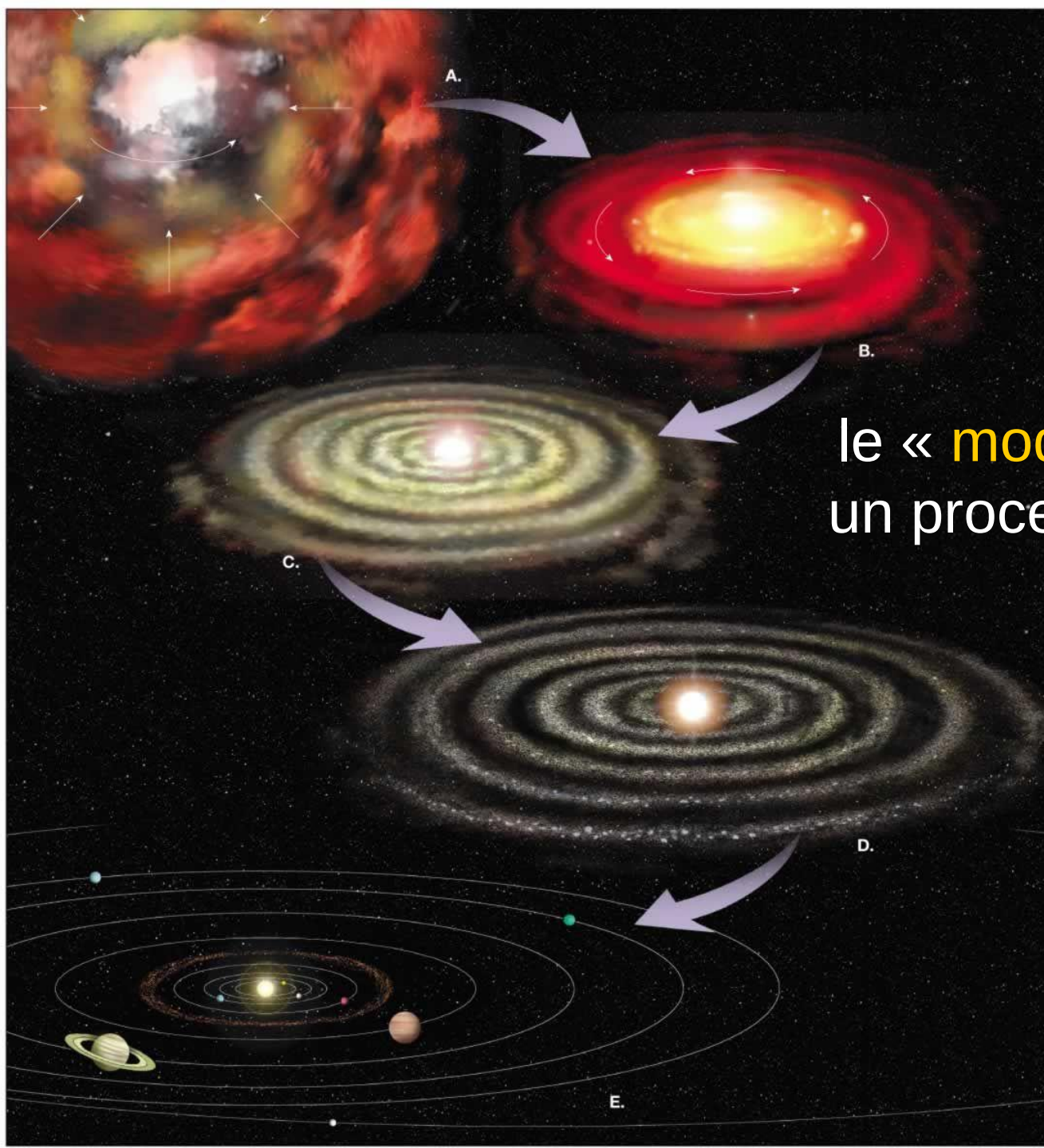


La formation des planètes

Philippe Thebault





le « **modèle standard** »,
un processus séquentiel

Contraintes sur le "modèle standard": masse et composition des planètes

❖ Planètes telluriques

O, Fe, Si, ... très peu de H, quasiment pas de He

(alors que le Soleil est à >98% du H et du He)

❖ Géantes gazeuses et géantes glacées

	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Masse totale	320 $M_{\oplus}$	95 $M_{\oplus}$	15 $M_{\oplus}$	17 $M_{\oplus}$
Roches & Glaces	10-45 $M_{\oplus}$	20-30 $M_{\oplus}$	10-14 $M_{\oplus}$	12-16 $M_{\oplus}$
Coeur	0-12 $M_{\oplus}$	0-15 $M_{\oplus}$	?	?
Gaz	275-310 $M_{\oplus}$	65-75 $M_{\oplus}$	1-5 $M_{\oplus}$	1-5 $M_{\oplus}$

❖ Masses totales

$$M_{\text{planètes-telluriques}} \approx 6.10^{-6} M_{\odot} \quad \& \quad M_{\text{planètes-geantes}} \approx 1.5 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$$

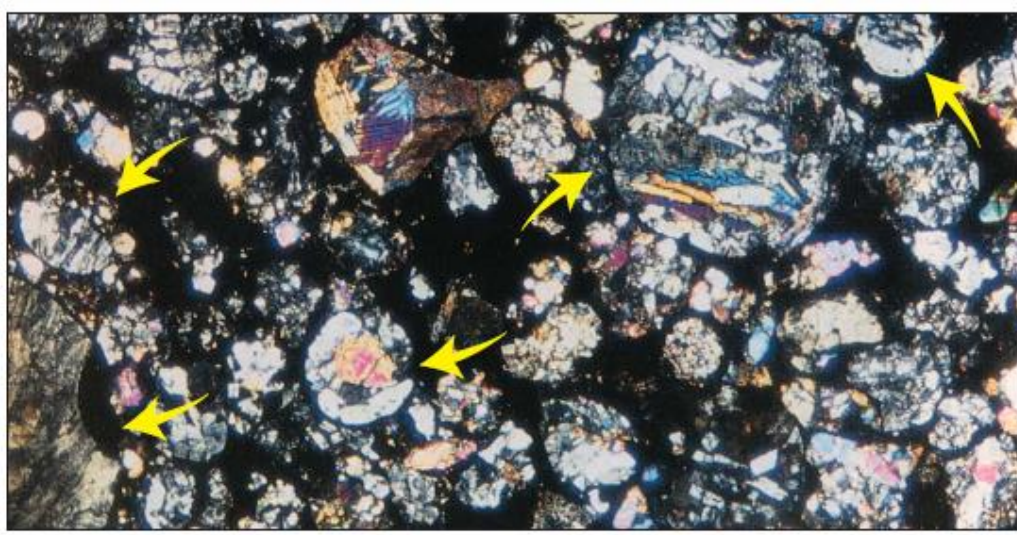
En extrapolant H et He « manquants », on reconstruit la « Nébuleuse Solaire de Masse Minimale » (MMSN)

↓

$$M \approx 0.03 M_{\odot}$$

Age du système solaire

Datation par radioactivité des Meteorites



"Clocks" in meteorites. A thin section of the meteorite Tieschitz—some chondrules are indicated.

plus vieilles météorites
CHONDRITES:

- CAI
- Chondrules
- Matrice

Plus vieilles roches: CAIs **$4.5672 \pm 0.0004(!)$ 10^9 ans**

Plus vieilles roches "différenciées": **$4.5662 \pm 0.0001(!)$ 10^9 ans**

Durée maximum de formation < **$10-100.10^6$ ans** pour la Terre
(séparation coeur/manteau)

Au commencement: un nuage moléculaire



Caractéristiques d'un nuage "mono-stellaire" typique

$$M_c \approx 1 M_{\odot}$$

$$R_c \approx 0.1 \text{ parsec}$$

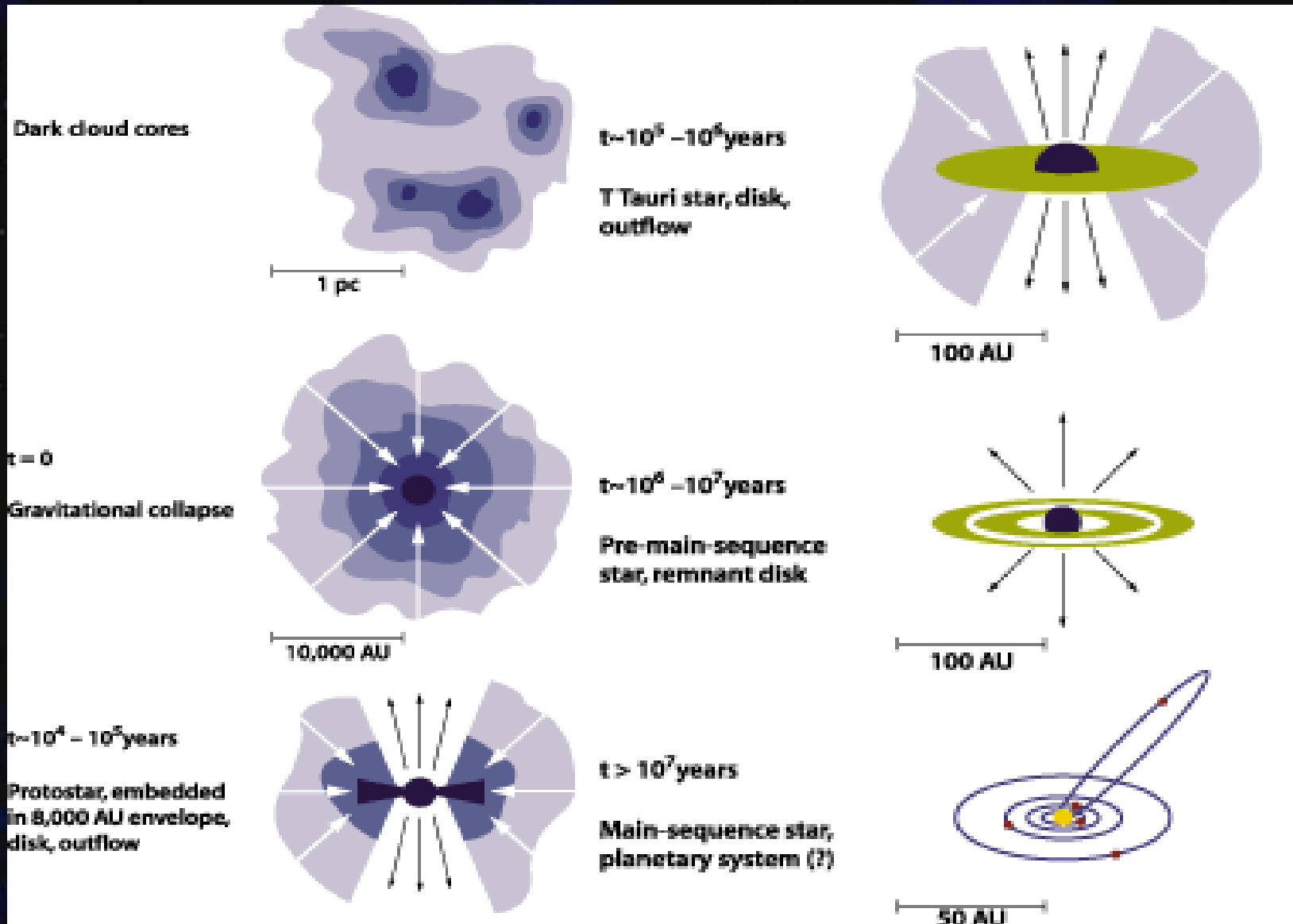
$$\text{Presque isotherme, } T_c \approx 10 \text{ K}$$

$$\text{Densité moléculaire } \approx 10^2 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$\rho \propto r^{-2} \quad (\text{sphères hydrostatiques isothermes})$$

$$\Omega \approx 10^{-14} \text{ s}^{-1} \quad (1 \text{ tour en } 1 \text{ million d'années})$$

Effondrement du nuage et formation du disque



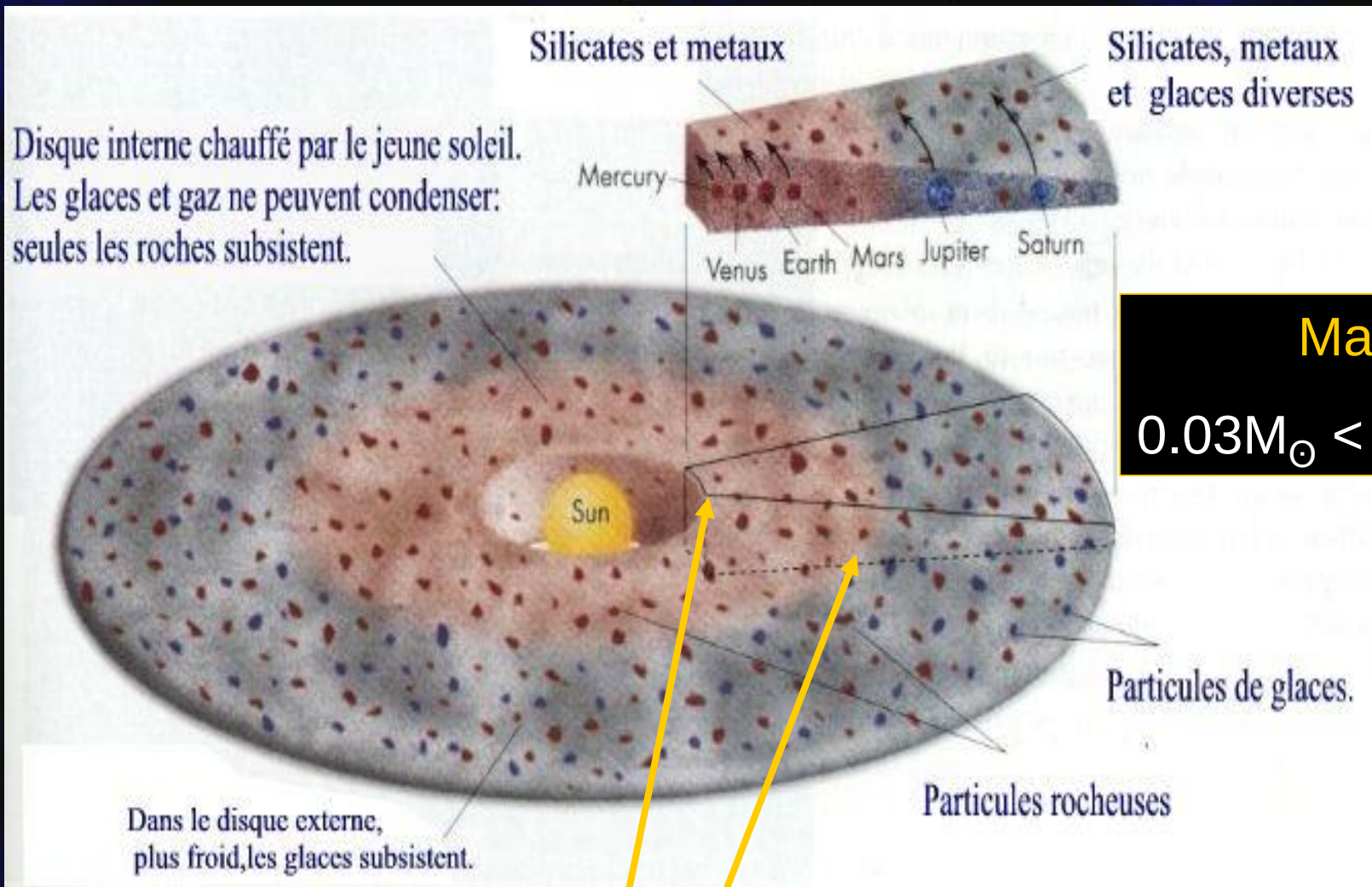
Pendant le collapse: coexistent nuage, disque et étoile!



En réalité, les
étoiles se forment
en groupe et
interagissent les
unes avec les
autres

Matthew Bate (2007)

un disque protoplanétaire: 99% gaz, 1% solides



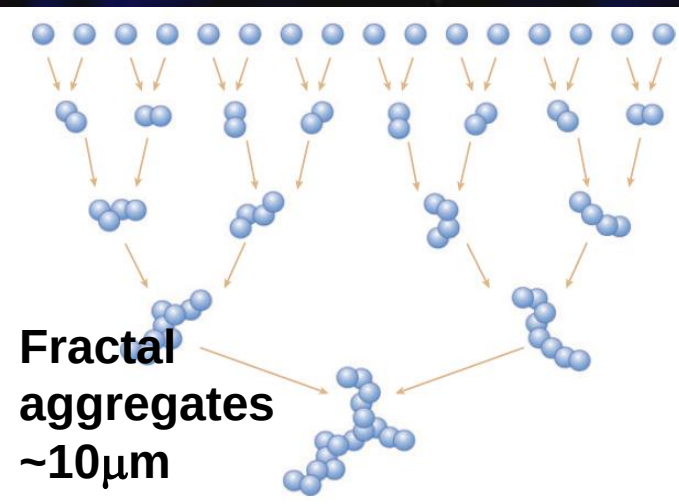
Masse

$$0.03M_{\odot} < M <$$

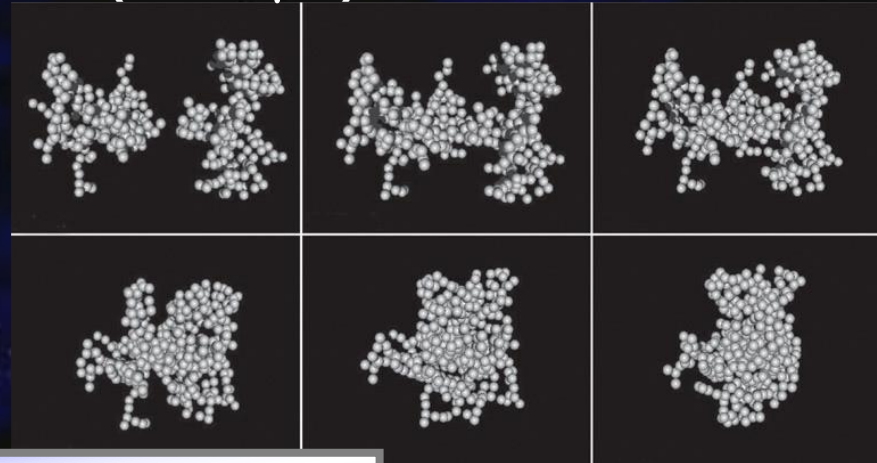
Frontière fondamentale (1) : $T \sim 1350^{\circ} \text{ K}$ condensation des silicate

Frontière fondamentale (2) : $T \sim 160^{\circ} \text{ K}$ condensation de l'eau

Grains initiaux: $0.1\text{-}1\text{ }\mu\text{m}$.



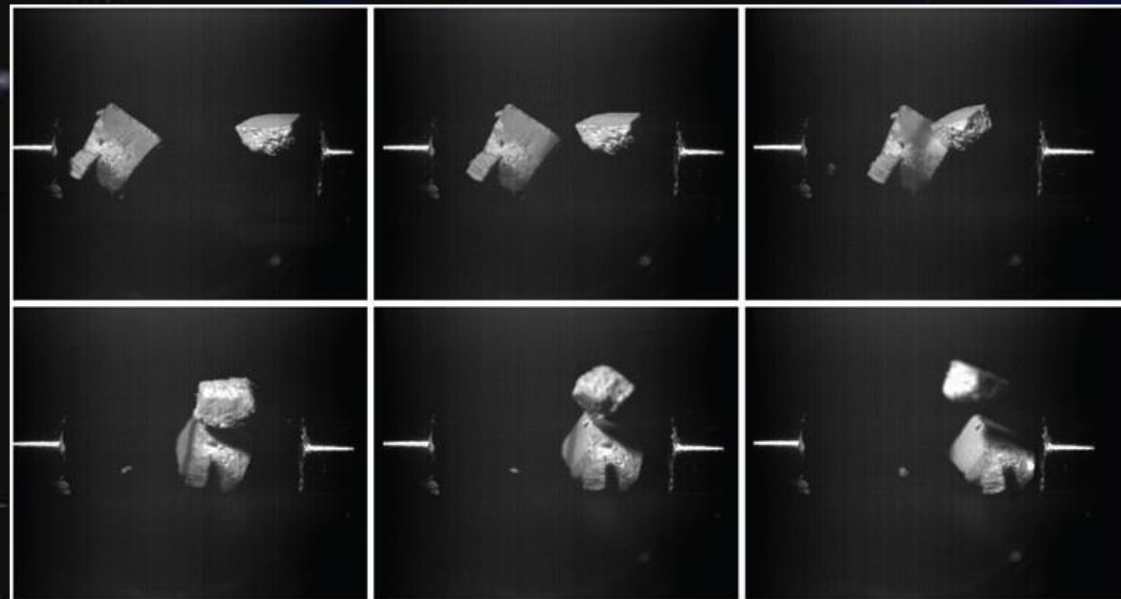
Compactage d'aggrégats fractaux
($50\text{-}500\mu\text{m}$)



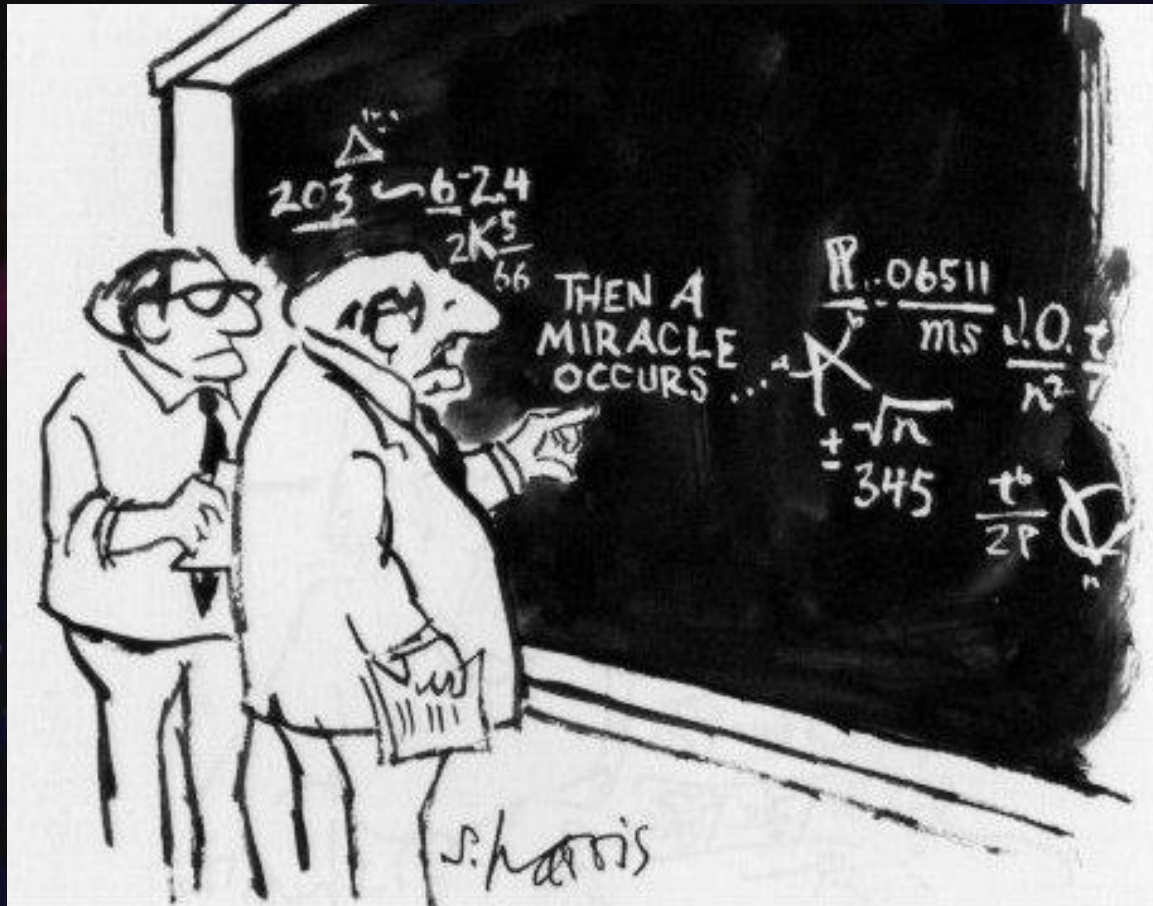
des grains aux cailloux



Fragmentation si $r > 10\text{cm}$



des cailloux aux "planetesimaux": un miracle se produit



"I think you should be more explicit here in step two."

from *What's so Funny about Science?* by Sidney Harris (1977)

Comment franchir la « barrière du mètre »?

Accrétion des planétésimaux par gravitation mutuelle

Une histoire de vitesse...

$$(v_{\text{évasion}}(1\text{km}) = 1\text{m/s})$$



$$\text{si } v_{\text{coll}} \gg v_{\text{évasion}}$$



$$\text{si } v_{\text{coll}} < v_{\text{évasion}}$$

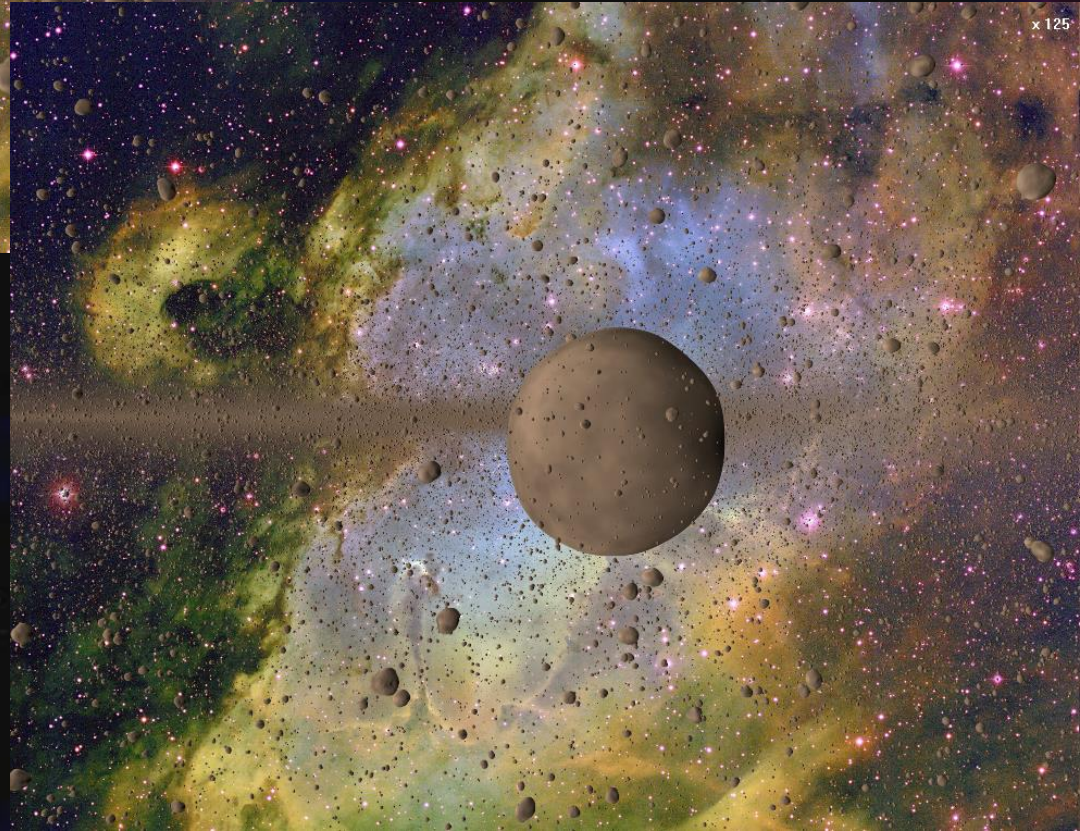


l'accrétion "boule
de neige":

un processus
rapide

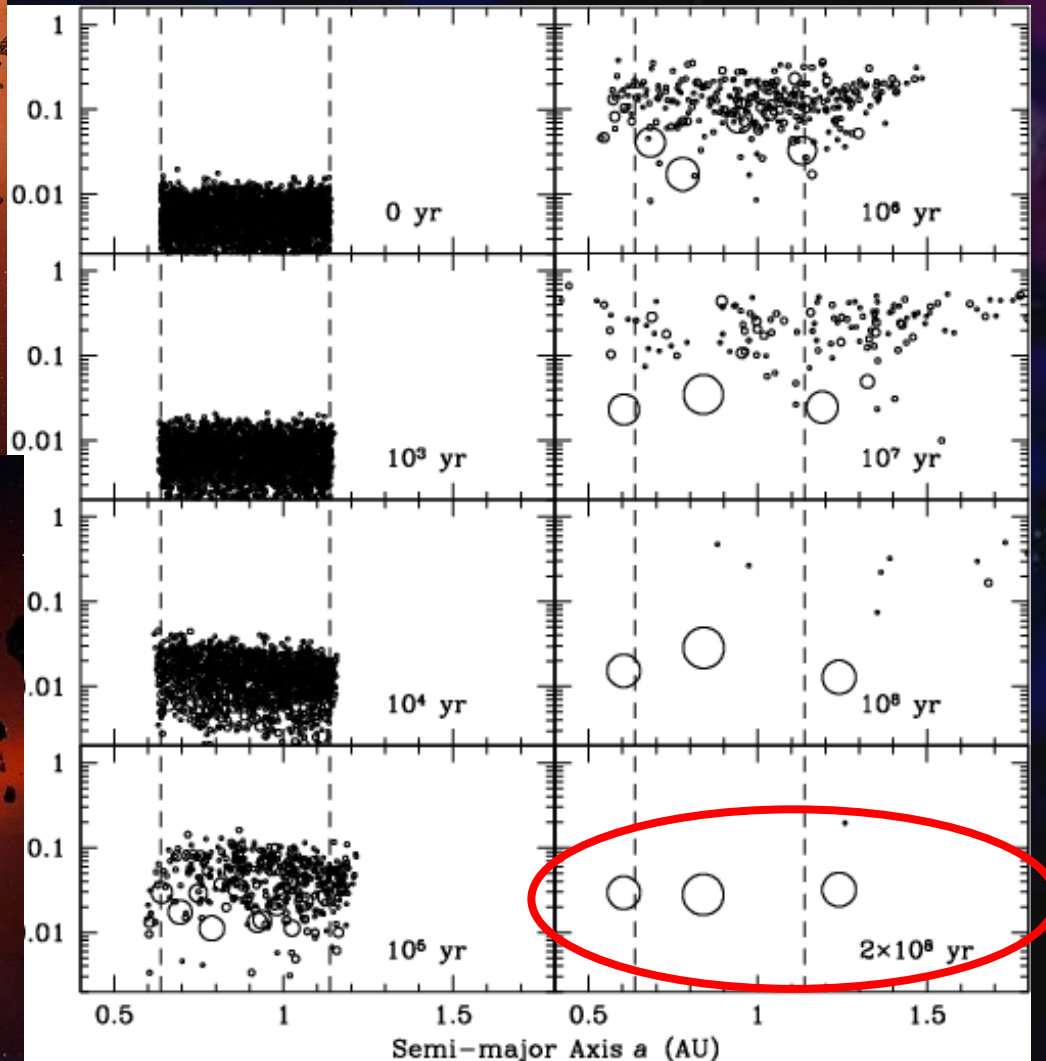


•Forme un corps de
~500km en ~10 000 ans

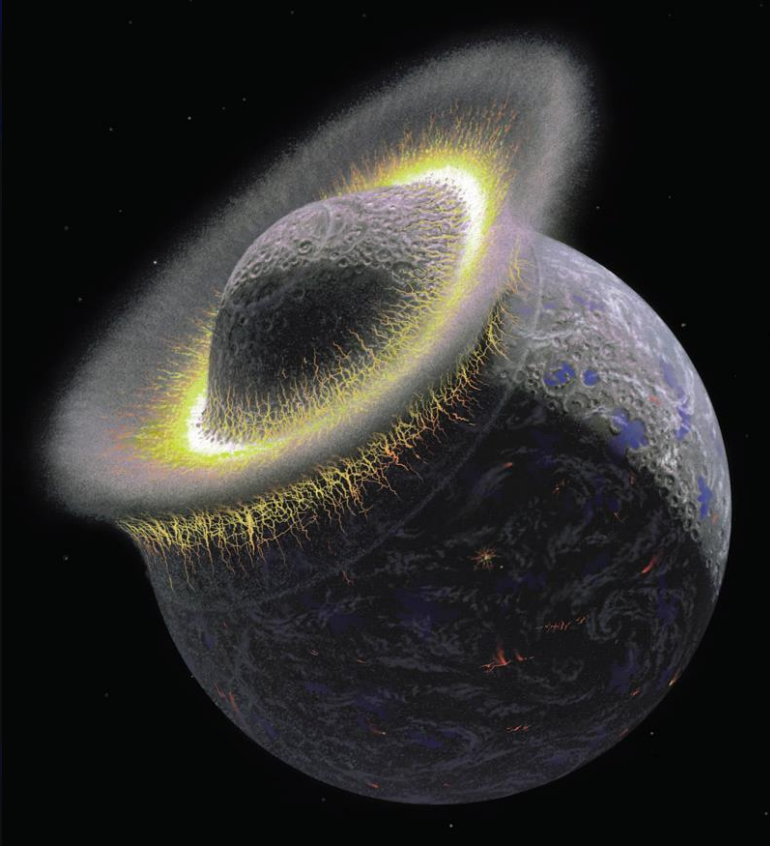


étapes finales

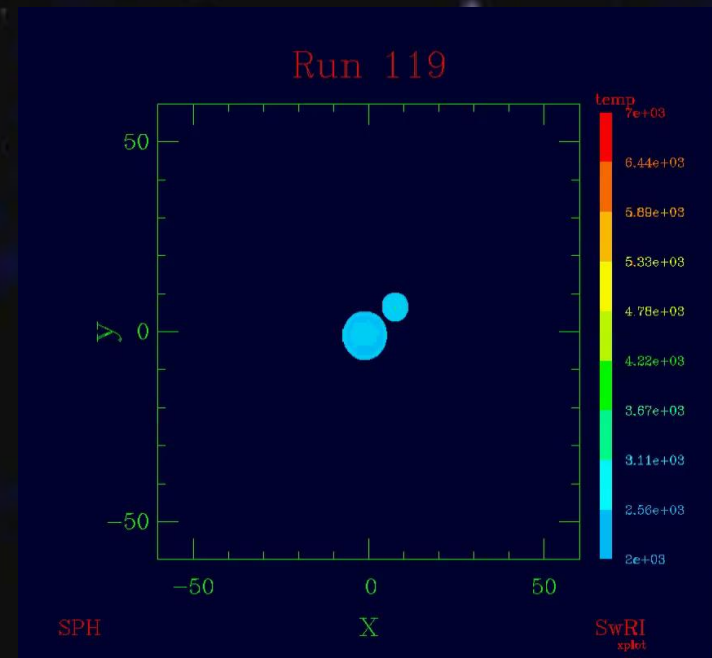
interactions mutuelles des embryons et vidage du système solaire interne



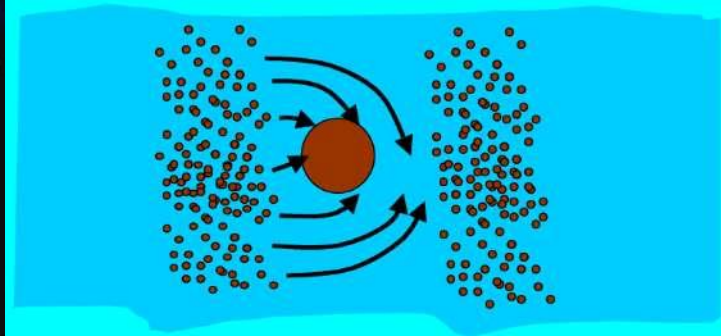
Formation de la Lune: impact avec la protoplanète "Theia" (?)



- ≈50 millions d'années après sa naissance, la Terre est impactée par Theia
- L'impact détruit Theia et une partie de la Terre
- Formation d'un disque de débris chauds autour de la Terre
- La Lune se forme dans le disque qui se refroidit

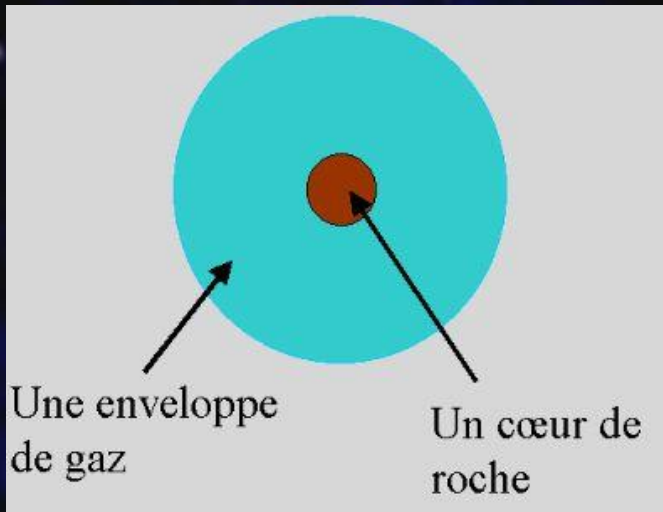
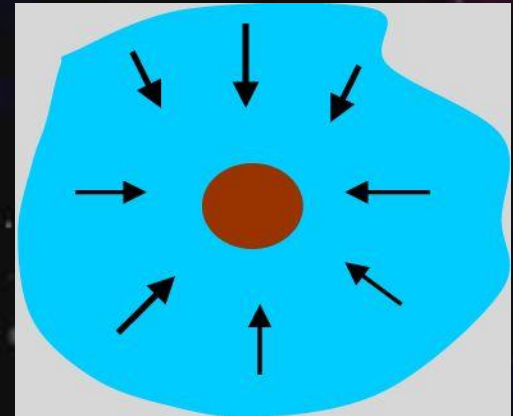


Formation des planètes géantes: modèle du coeur solide



1) Formation d'un cœur solide par accrétion

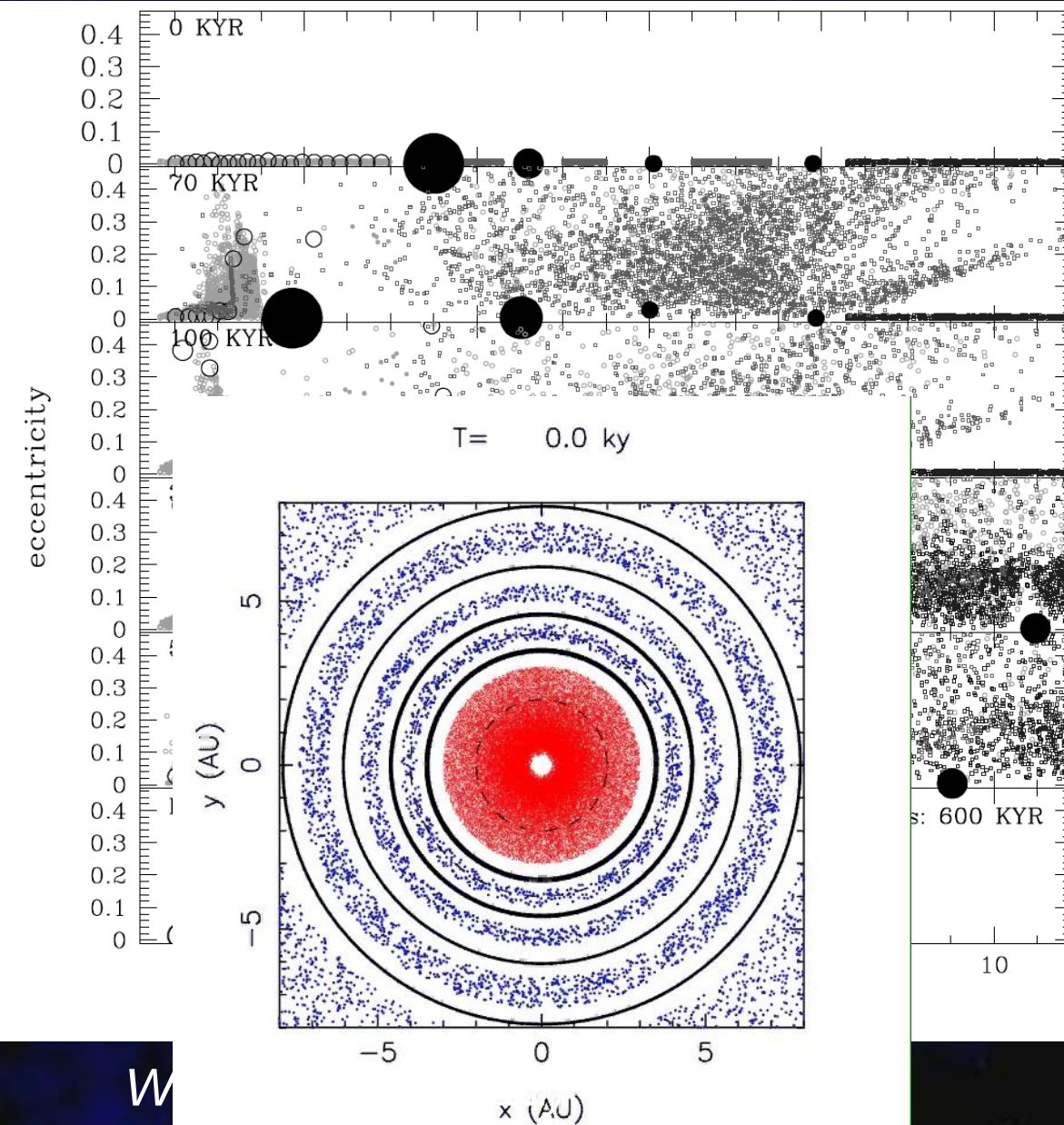
2) quand le cœur dépasse $5-10M_{\text{Terre}}$,
accrétion du gaz



Structure finale (?)



Migration de Jupiter et Saturne: le "Grand Tack" (?)



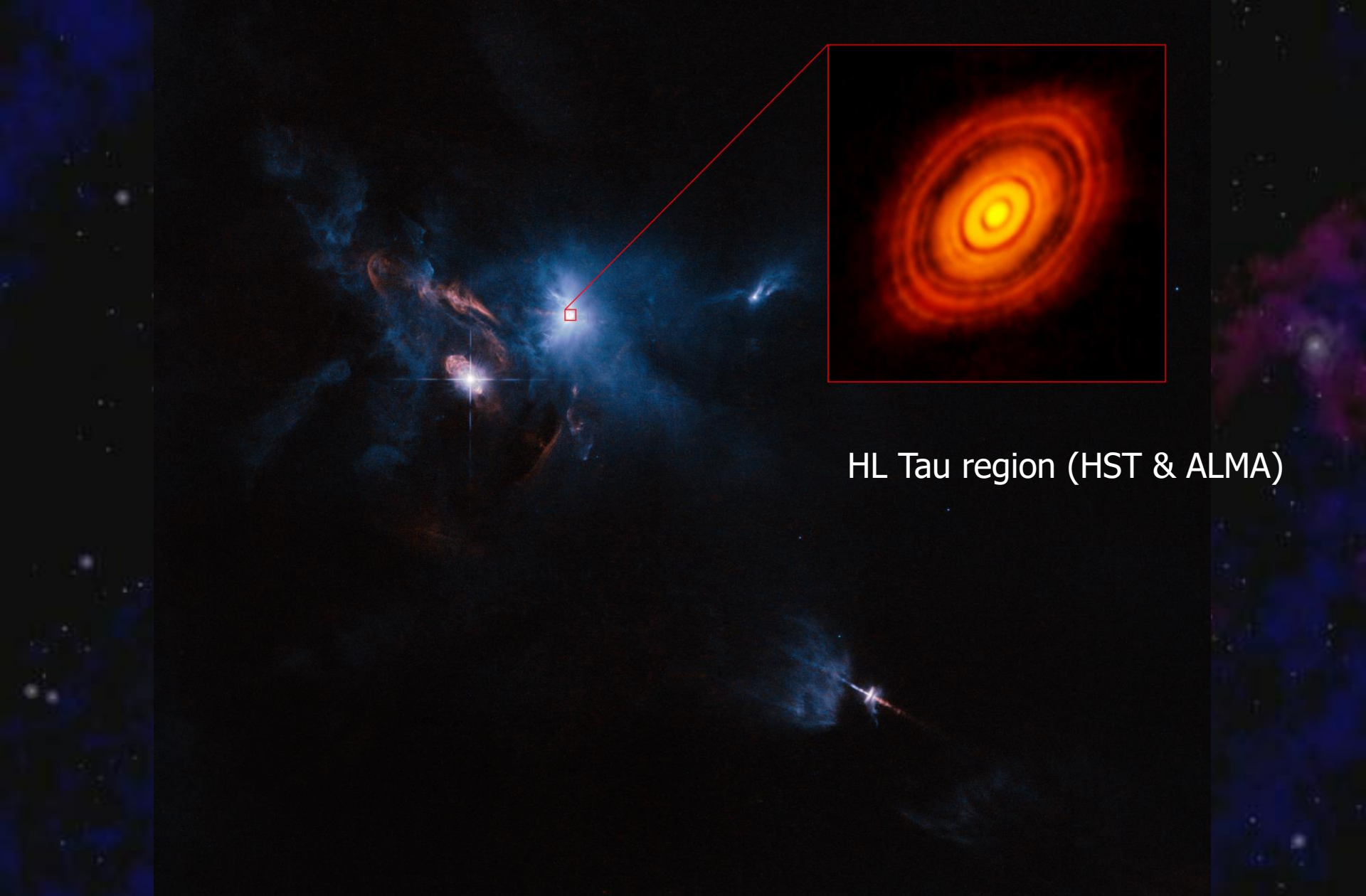
Jupiter et Saturne migrent jusqu'à la région des planètes telluriques puis repartent.

Pourrait expliquer:

- 1) La petite taille de Mars
- 2) Le vidage de la ceinture d'astéroïdes.

Le modèle "standard" à l'épreuve des exoplanètes

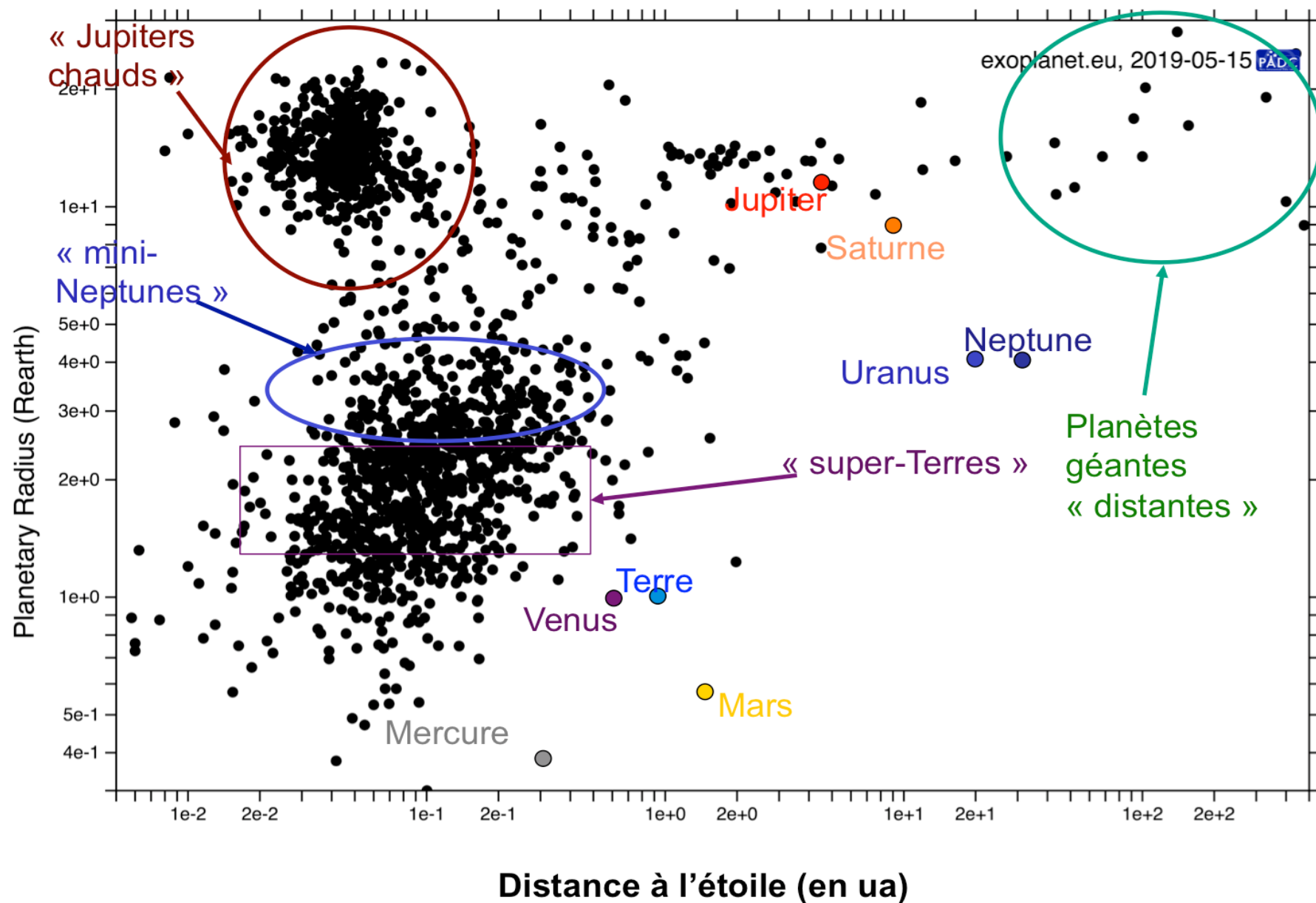




HL Tau region (HST & ALMA)

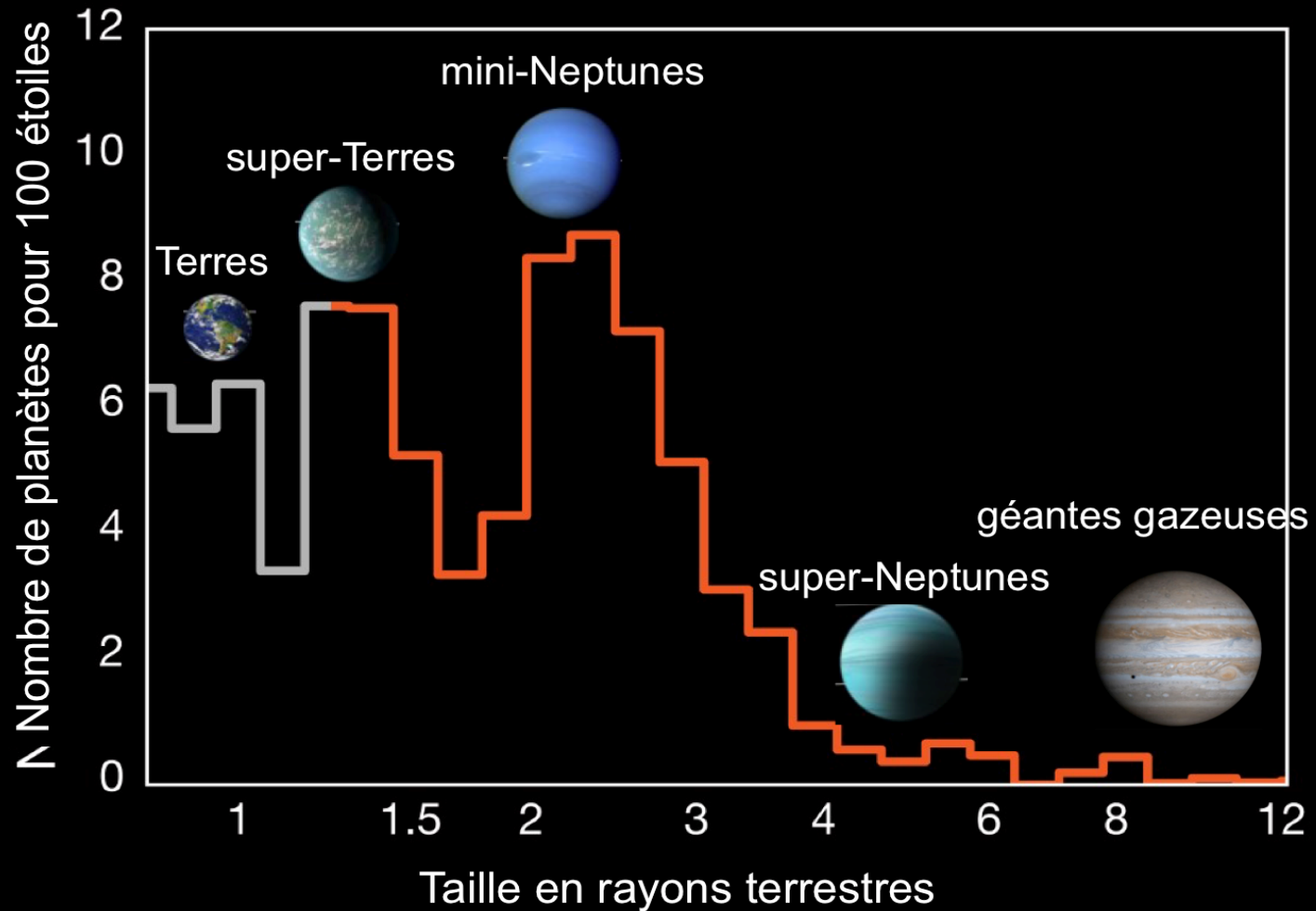
Un disque proto-planétaire pris en flagrant déli

Le bestiaire exoplanétaire



Fréquence « débiaisée » des exoplanètes

planètes orbitant en moins de 100 jours (données Kepler)



PLANET OCCURRENCE RATES

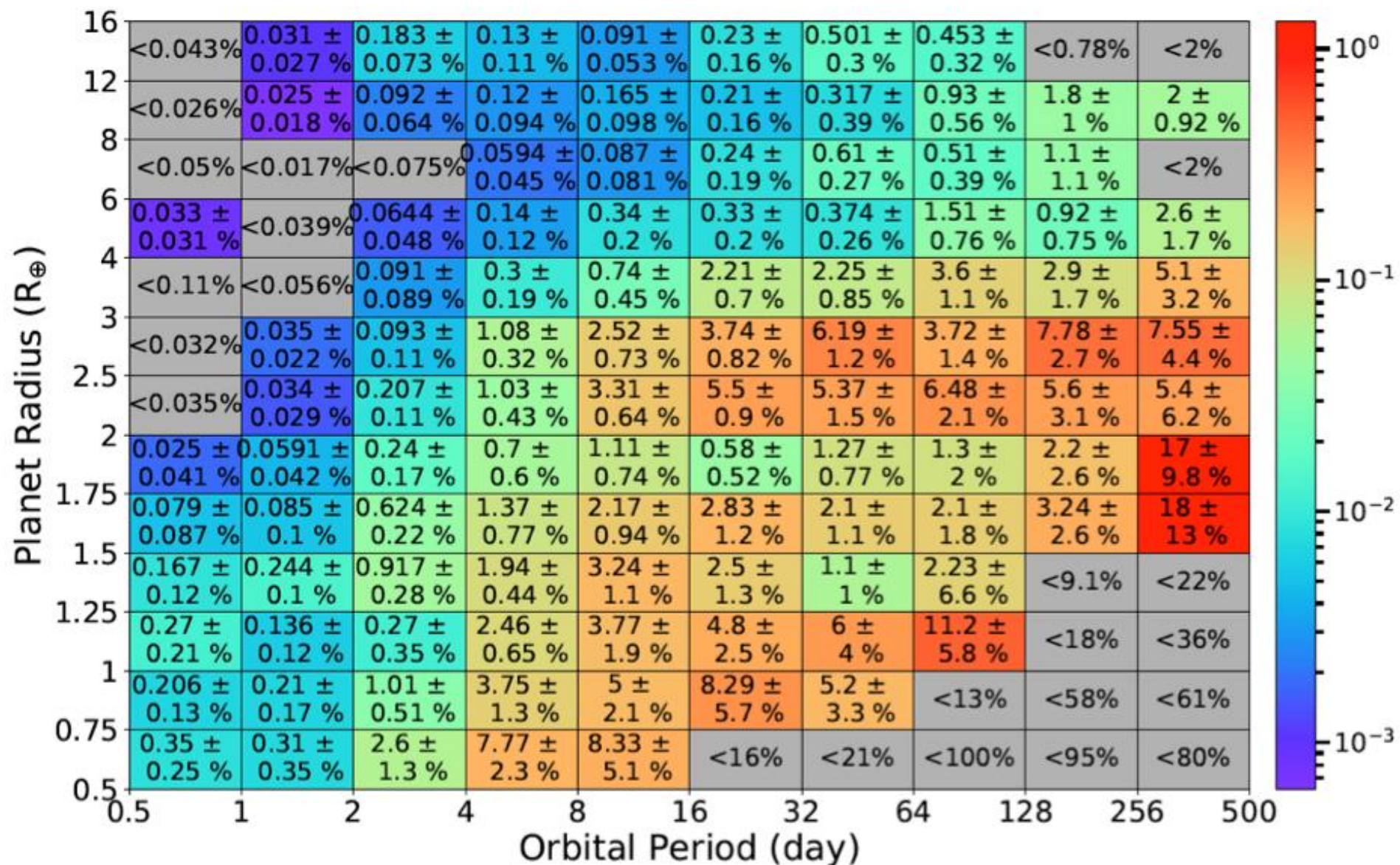
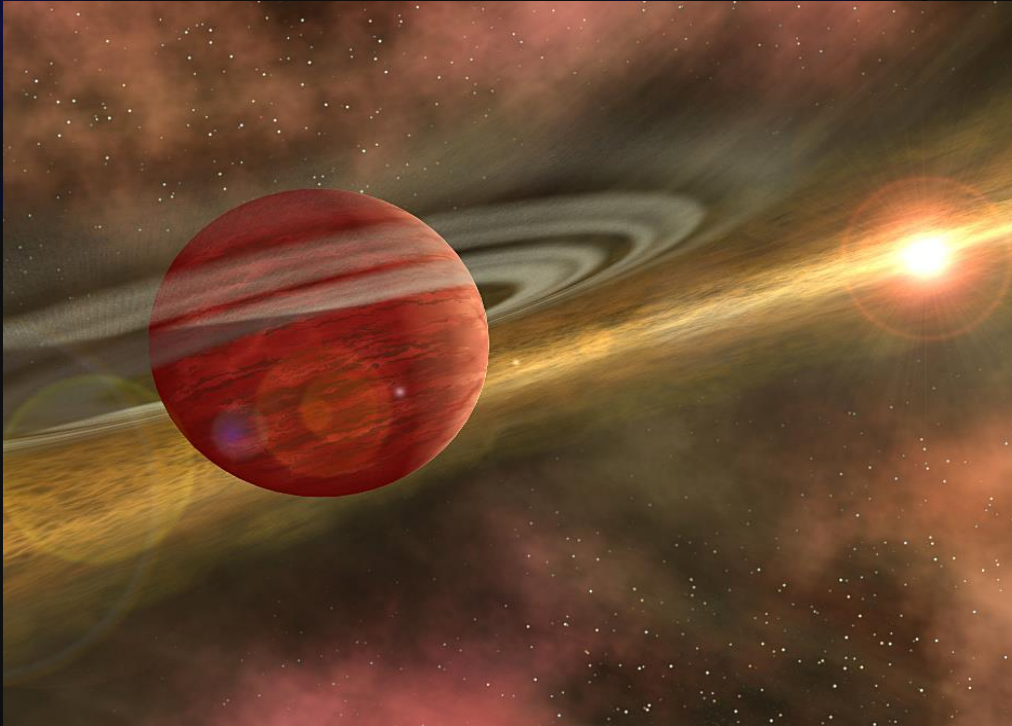


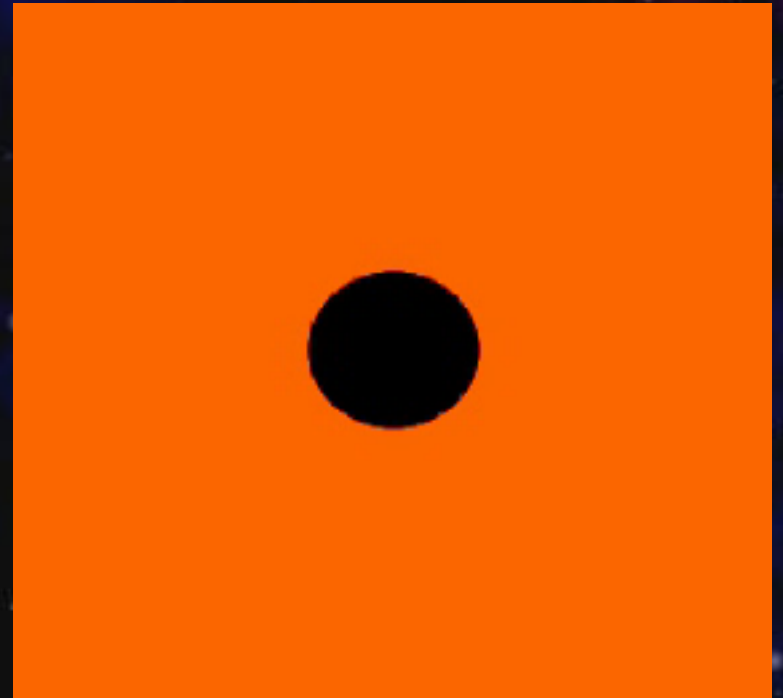
Figure 2. Inferred occurrence rates for Kepler's DR25 planet candidates associated with high-quality FGK target stars. These rares are

Former les « Jupiter-chauds »



Migration de type I et type II

Problème: ça marche trop bien!



Formation des Super-Terres et des mini-Neptunes

accrétion
des solides

accrétion
du gaz

chauffage

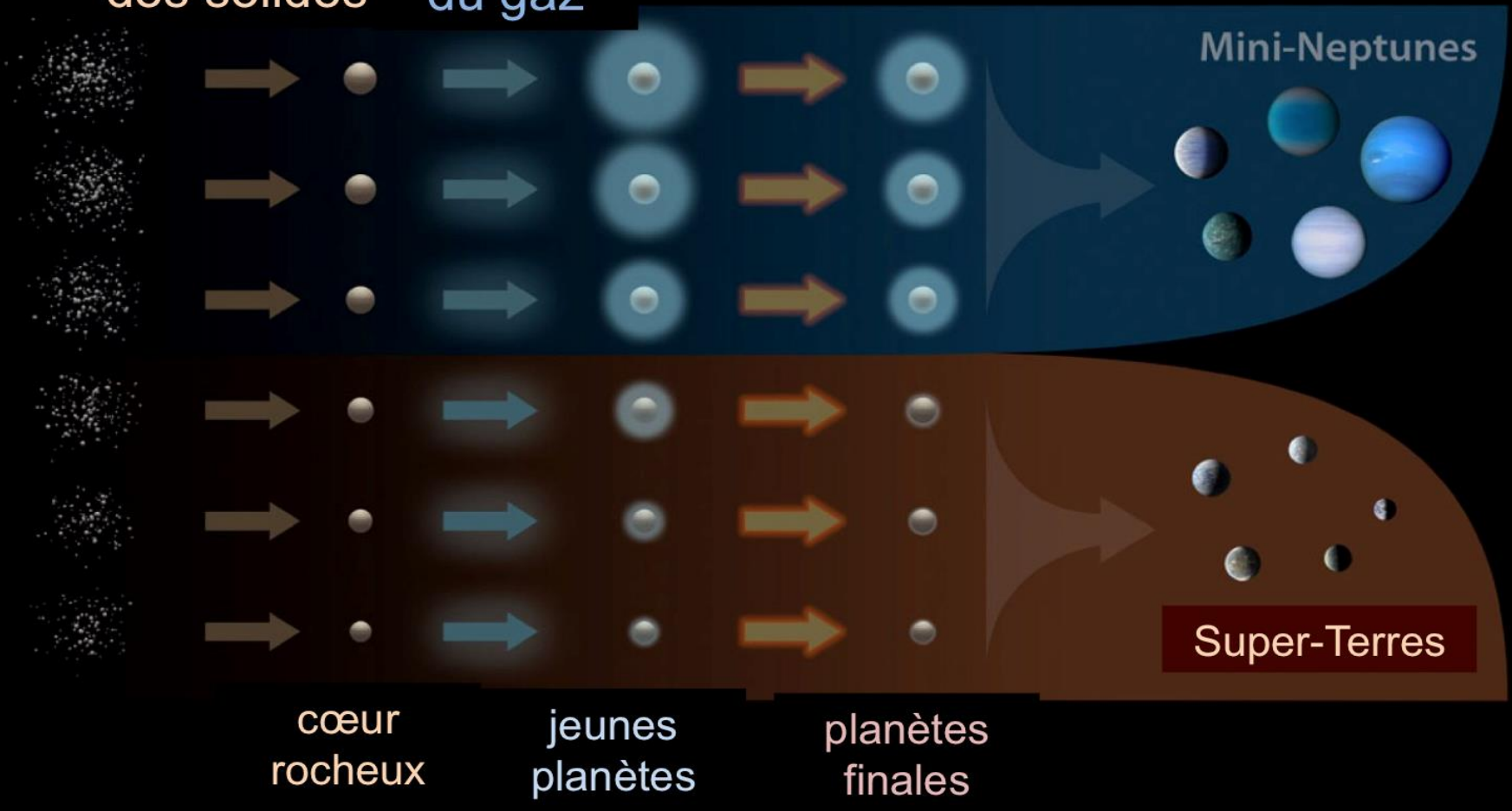
Mini-Neptunes

Super-Terres

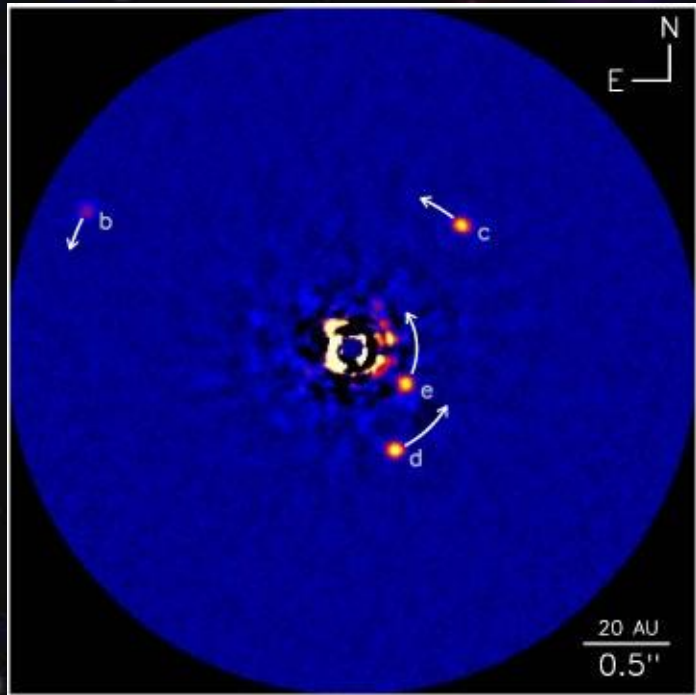
cœur
rocheux

jeunes
planètes

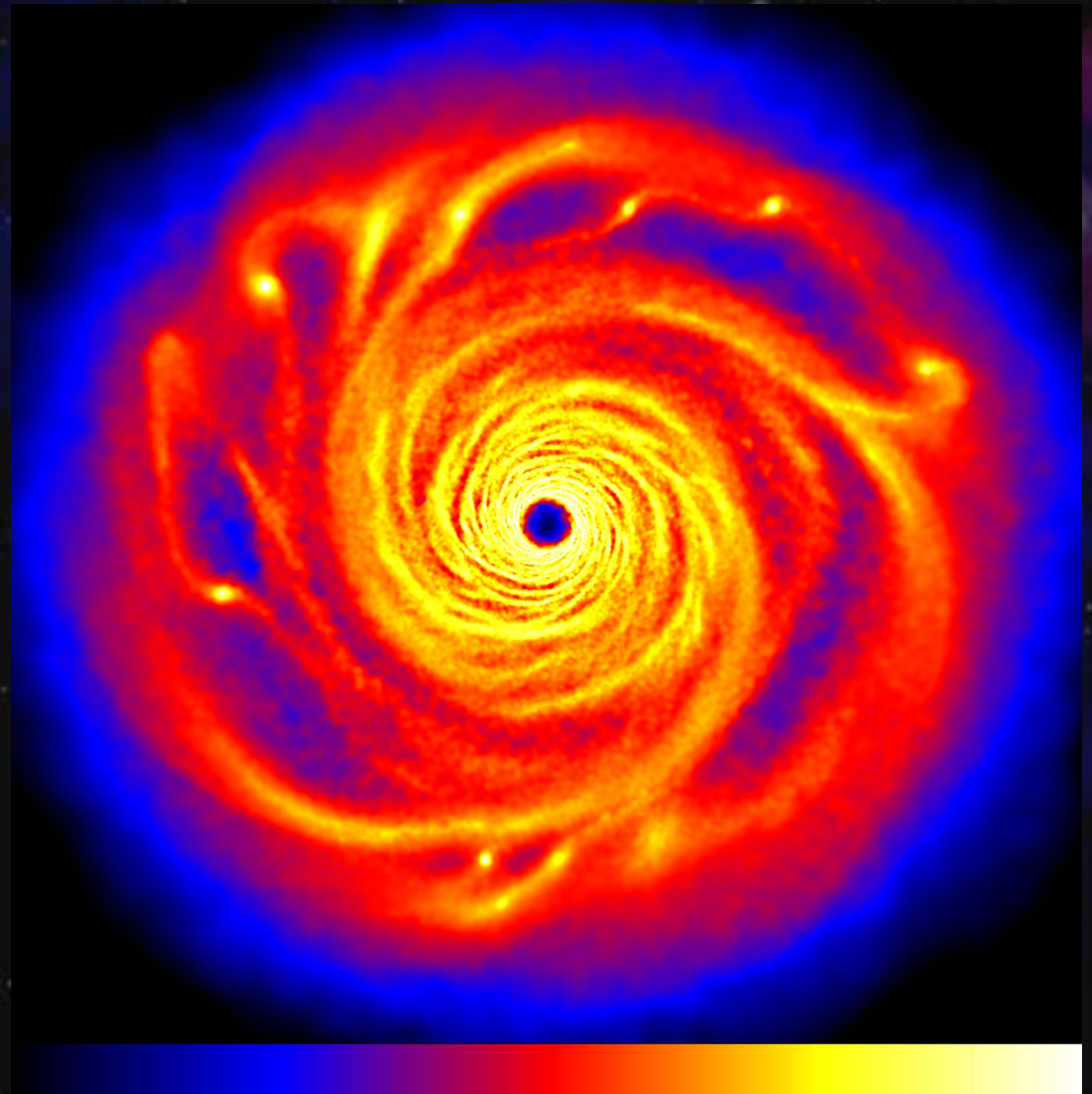
planètes
finales



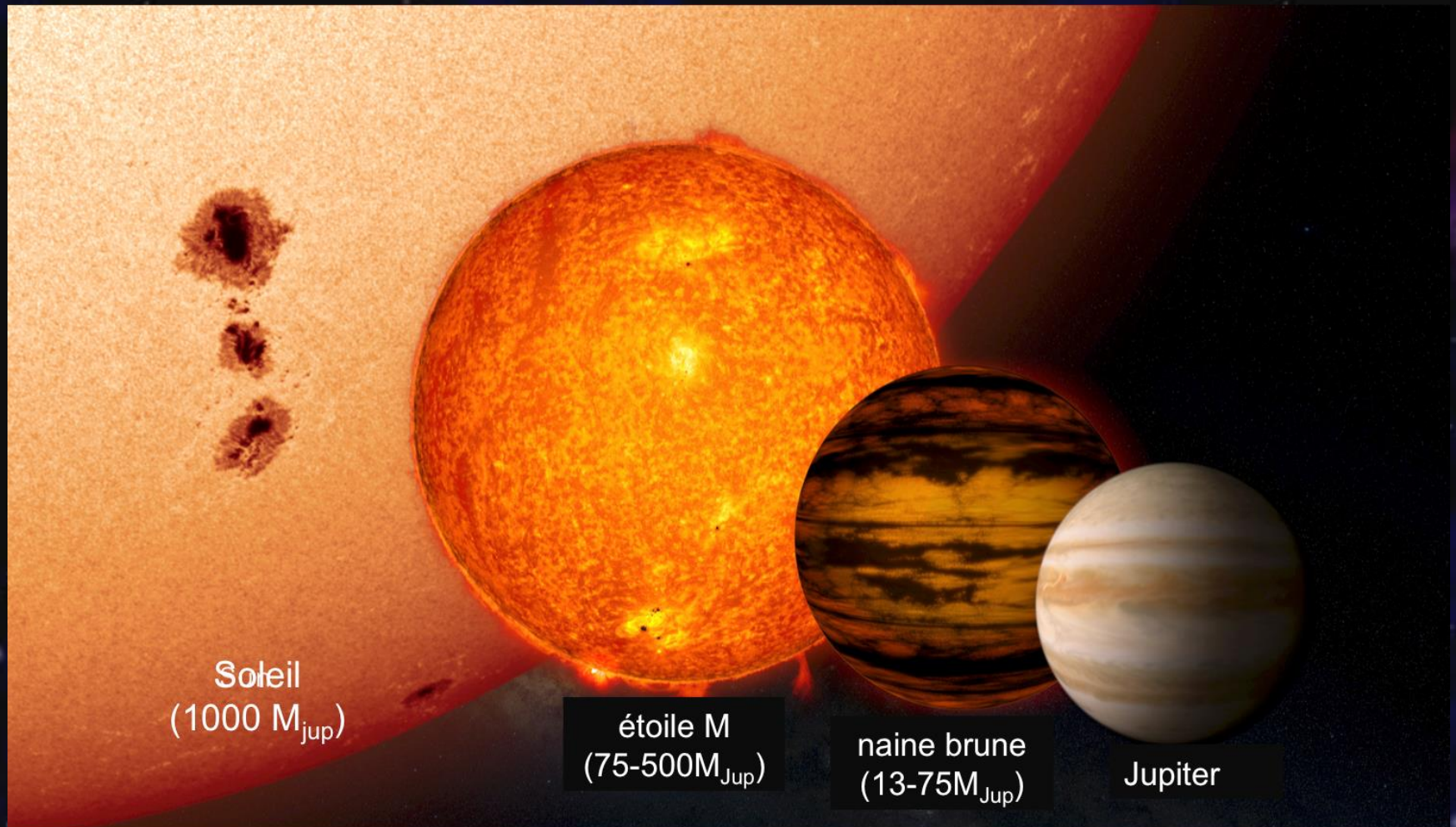
Formation des « géantes lointaines » par instabilité gravitationnelle dans le disque?



Le système HR8799



À la limite planète/étoile...



Les plus petites étoiles se forment elles différemment
des plus grosses planètes?

200 exoplanètes dans des binaires

Le plus grand défi au modèle standard?

