

Formation de planètes par instabilité nucléée

Yann Alibert

C. Mordasini, W. Benz, O. Mousis, C. Winisdoerffer, I. Baraffe & G. Chabrier

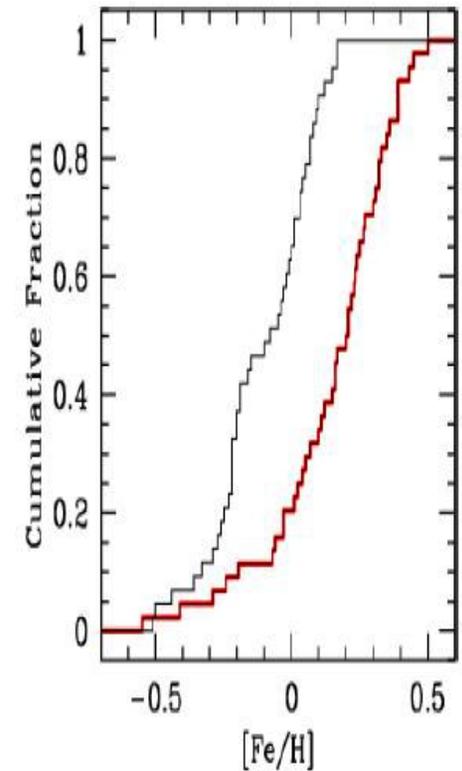
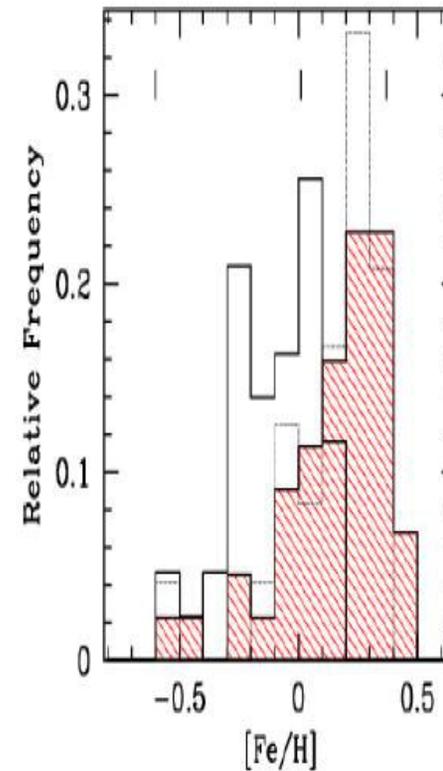
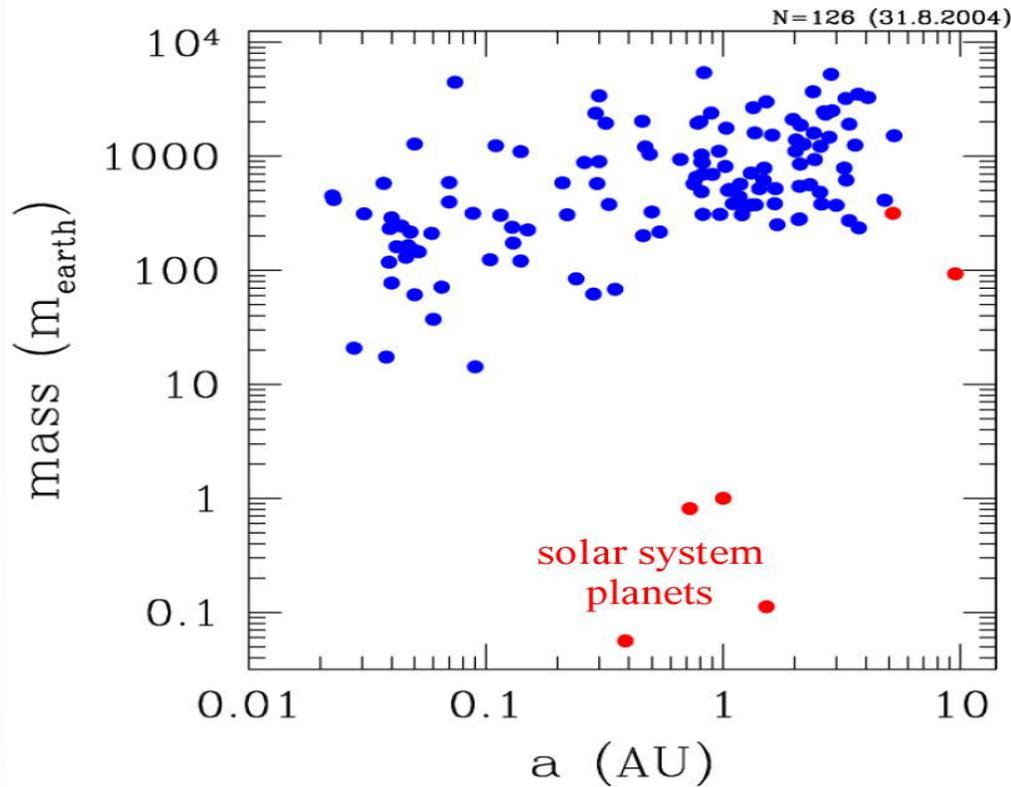


Résumé

- Contraintes observationnelles
- Modèles de formation
 - instabilité nucléée (core-accretion model)
 - instabilité de disque
- Modèles étendus
 - ↳ Temps de formation
 - ↳ Formation du système solaire
 - ↳ Exoplanètes

Planètes extrasolaires

- Très grande diversité
 - masse : quelques M_{\oplus} \longrightarrow $17M_J$
 - demi grand-axe : 0.02 AU \longrightarrow 6AU
 - effet de métallicité



Durée de vie des disques

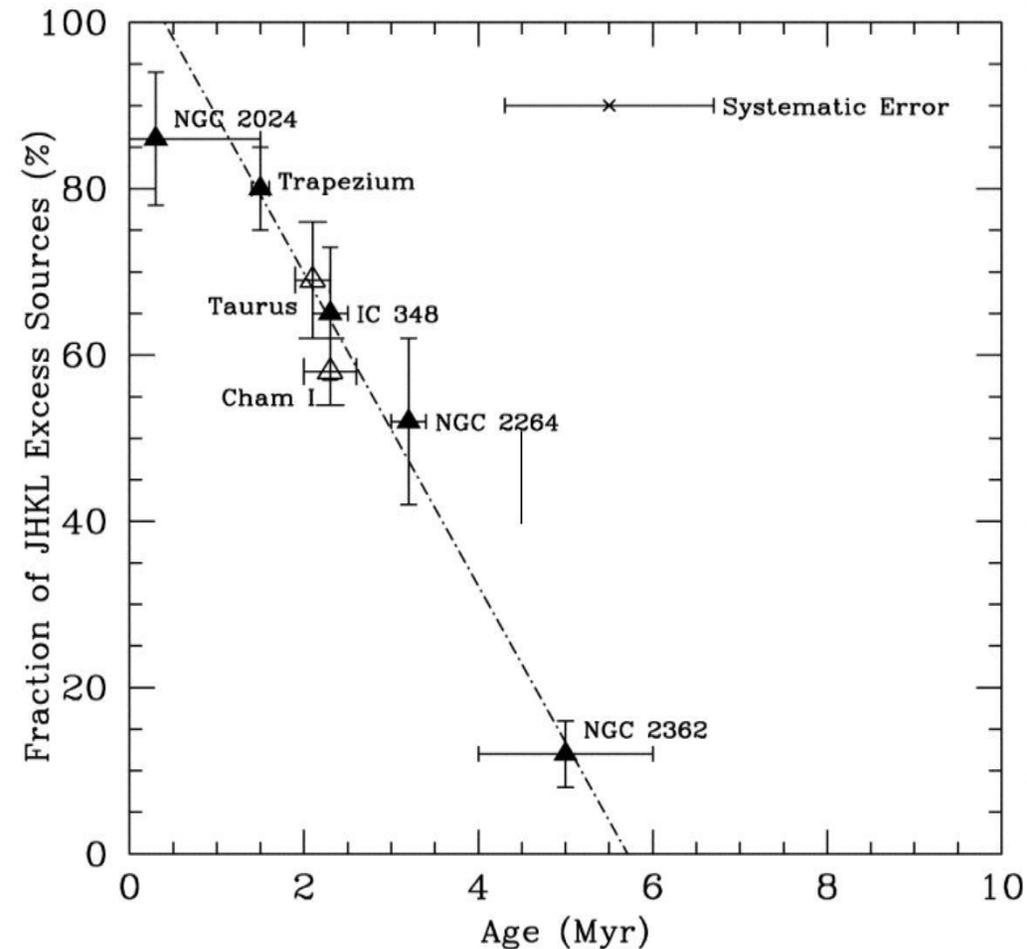
● mesures par excès infrarouge (photométrie bande L (3.4 μm))

- présence de poussière à $\sim 900\text{K}$

⇒ **disque interne**

Cluster	JHKL Excess Fraction ¹	Mass ² (M_{\odot})	Age (Myr)	Reference ³
NGC 2024...	112/131 (85% \pm 8%)	0.13	0.3	1
Trapezium...	312/391 (80% \pm 5%)	0.16	1.5	2
IC 348...	59/91 (65% \pm 8%)	0.19	2.3	2
NGC 2264...	26/50 (52% \pm 10%)	0.85	3.2	2
NGC 2362...	9/75 (12% \pm 4%)	1.00	5.0	3
NGC 1960...	1/37 (3% \pm 3%) ⁴	1.30	30.0	4

Haich et al. 2001



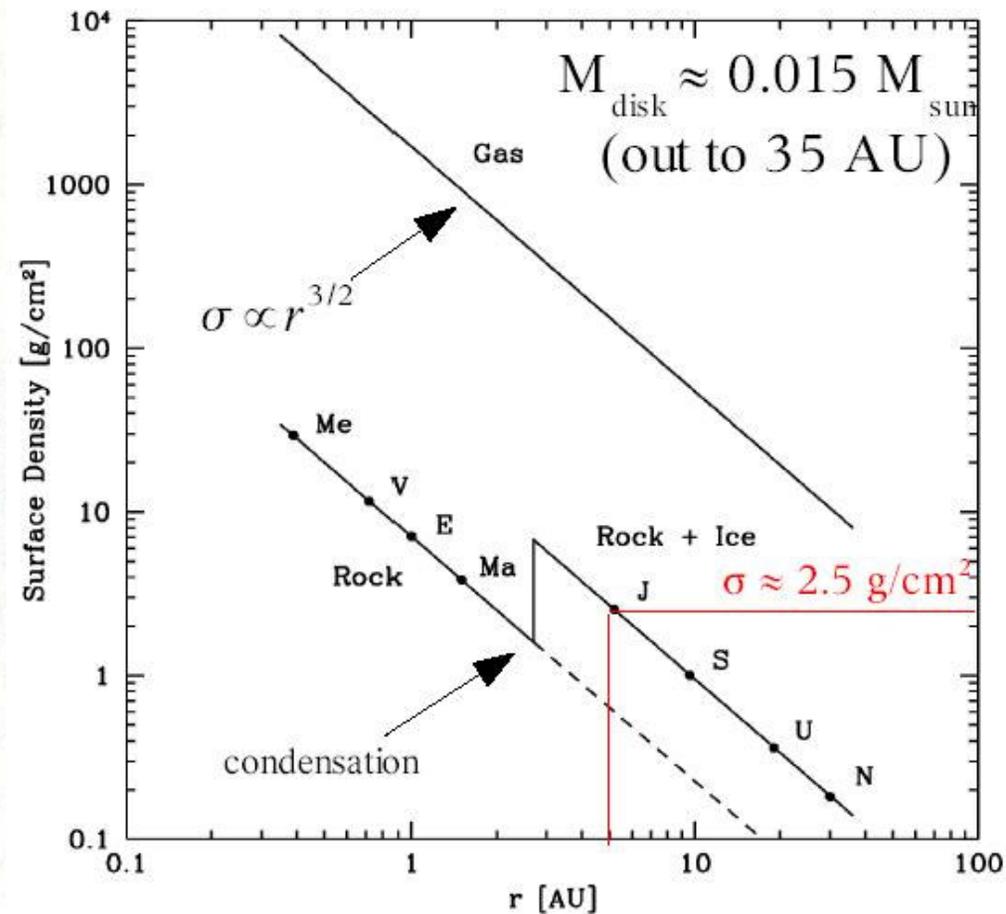
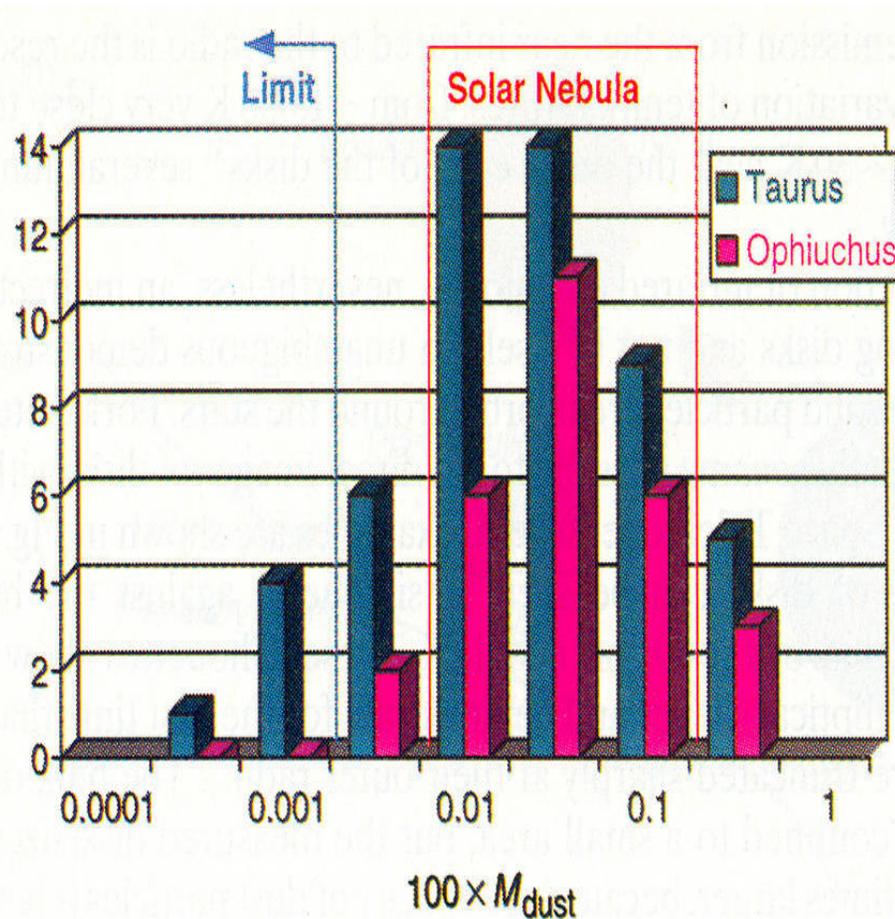
→ temps de vie relativement court ($\tau_{1/2} \sim 3 \text{ Myr}$)

Les planètes géantes doivent se former en $\sim 6 - 8 \text{ Myr}$

Masse des disques protoplanétaires

- Emission dans le continuum (mm)

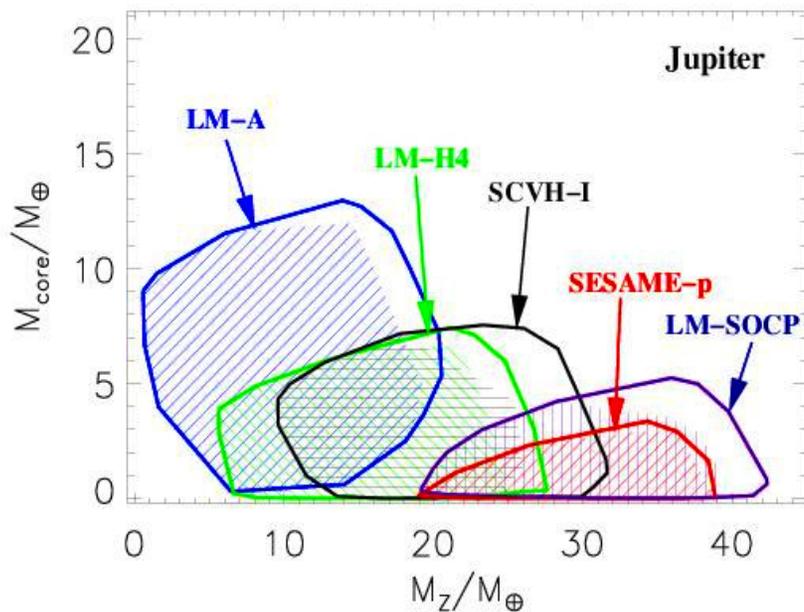
- Minimum Mass Solar Nebula
e.g. Ruden 2000



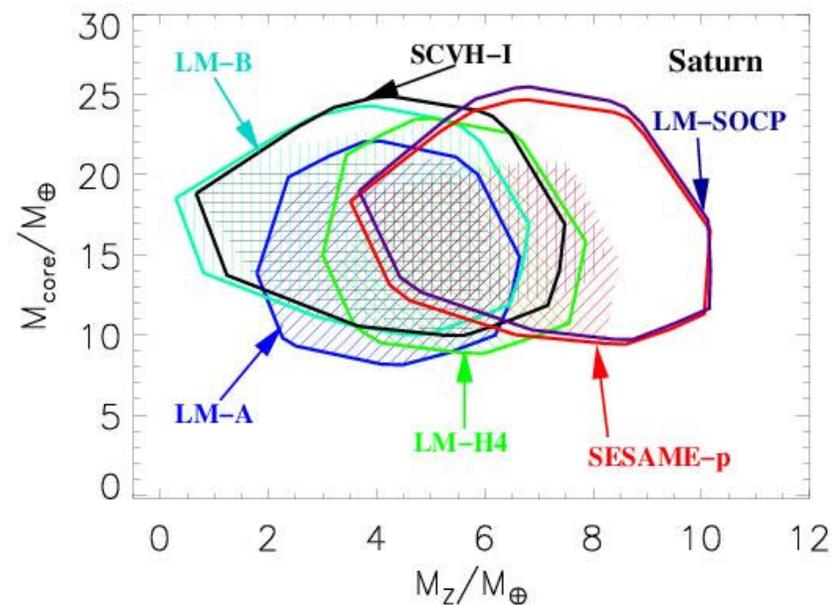
Masse typique de l'ordre de 0.001 à 0.1 M_{\odot}

Jupiter et Saturne

● Structure interne



Saumon & Guillot 2004



● Composition atmosphérique : X/H comparé à solaire

C	3.7 ± 0.9	Ar	1.8 ± 0.4
N	3.2 ± 1.2	Kr	2.4 ± 0.4
S	2.7 ± 0.6	Xe	2.1 ± 0.4

Mahaffy et al. 2000; Wong et al. 2004

C	3.2 ± 0.8	C	8.1 ± 1.6
N	2.4 ± 0.5		
S	$\sim 12 ??$		

Brigg & Sackett 1989, Kerola et al. 1997

Flasar et al. 2005

Résumé des contraintes

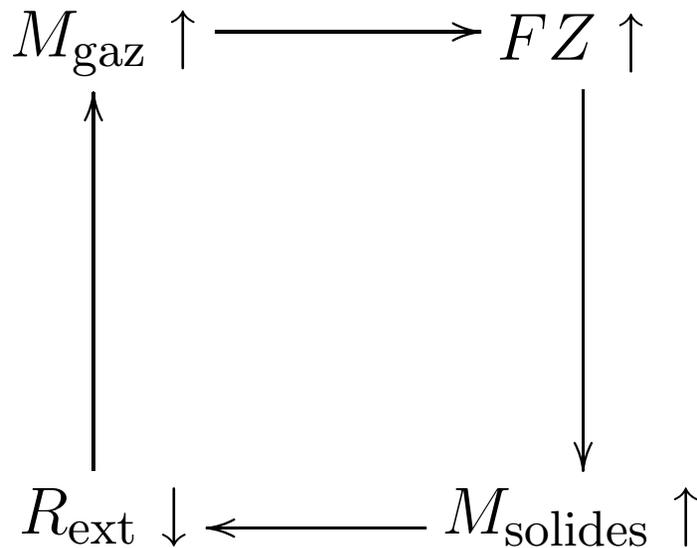
- Système solaire
- Exoplanètes
- Disque protoplanétaires

Un modèle de formation de planètes doit satisfaire l'ensemble de ces contraintes

Modèle d'instabilité nucléée (Pollack et al. 1996)

Formation en trois phases à partir d'un embryon de $\sim 0.5M_{\oplus}$

- 1) accrétion des **planetesimaux de la feeding zone**
- 2) accrétion **lente** de solides et de gaz

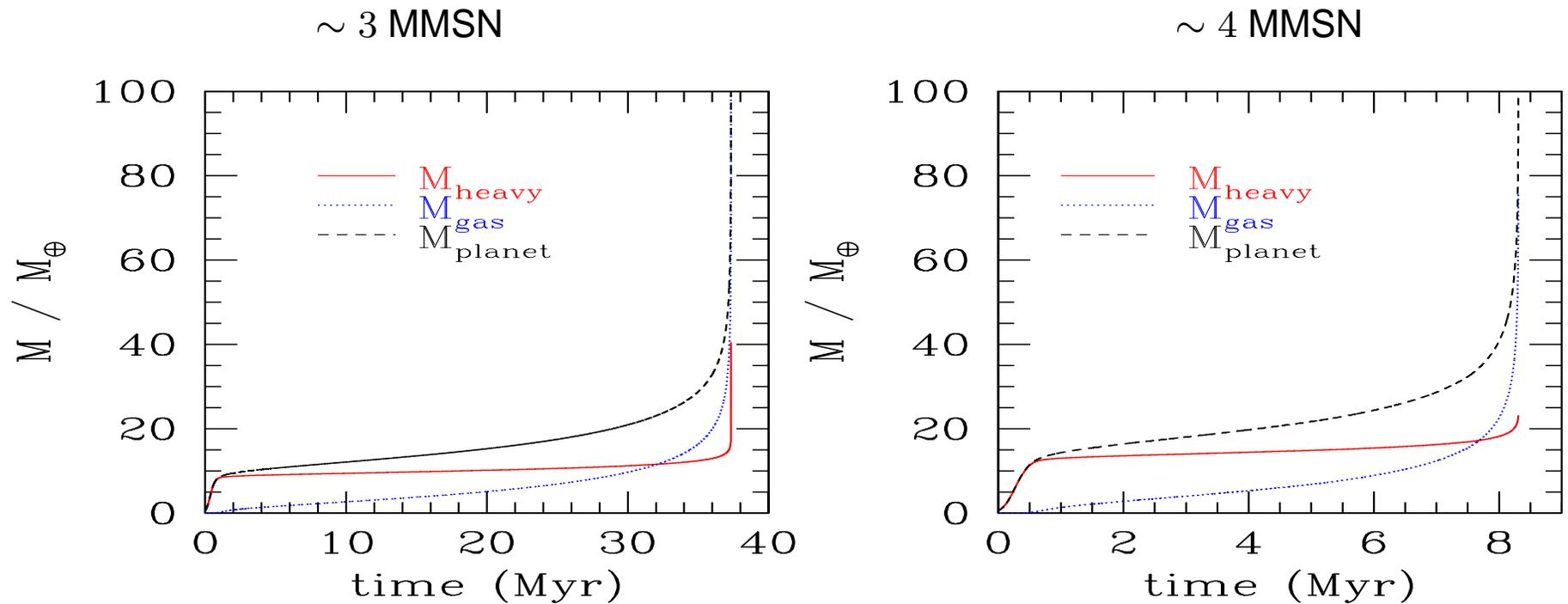


$$R_{\text{planete}} = R_{\text{Hill}}$$

$$\text{taille de la FZ} \propto R_{\text{Hill}} \propto M_p^{1/3}$$

- 3) plus d'équilibre \implies **runaway**
 \implies planète géante

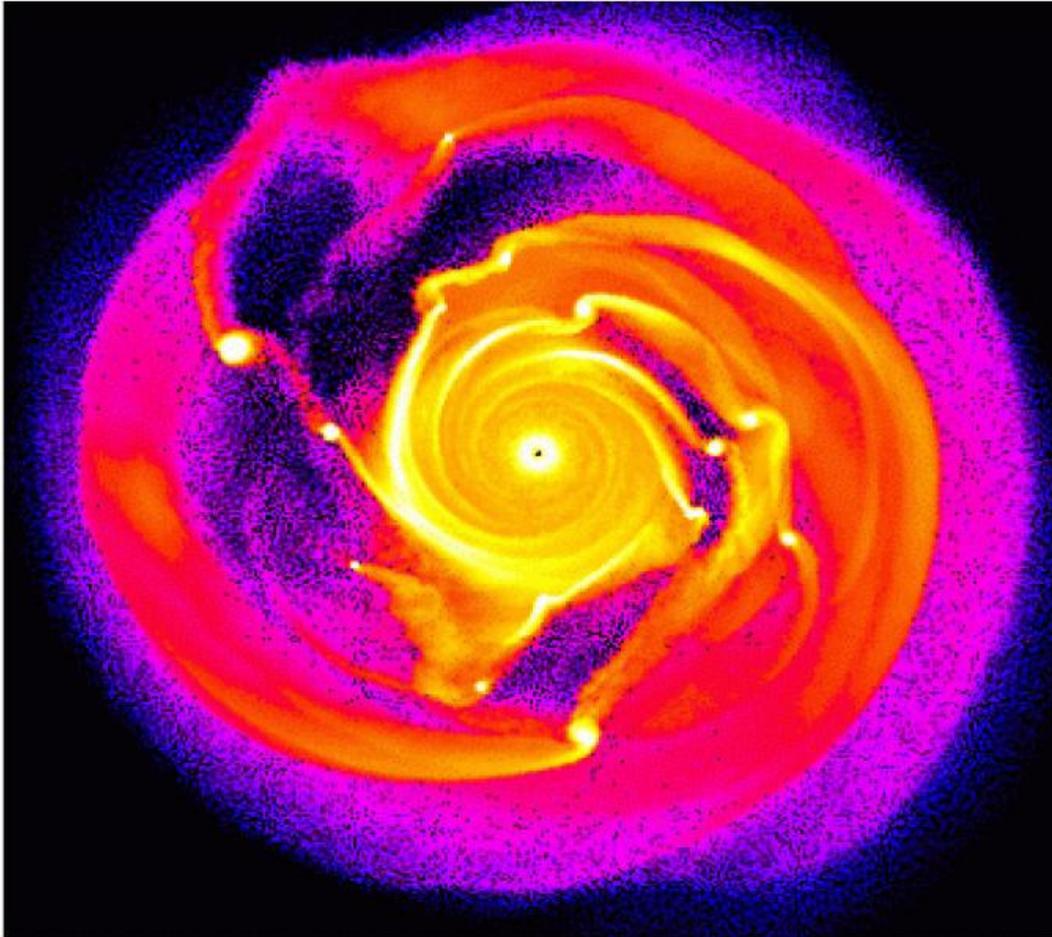
Modèle d'instabilité nucléée (Pollack et al. 1996)



- \Rightarrow temps de formation donné par la phase 2
- \Rightarrow **8-10 M_{ans}** dans une nébuleuse massive
- \hookrightarrow **problème d'échelle de temps**

Instabilité gravitationnelle

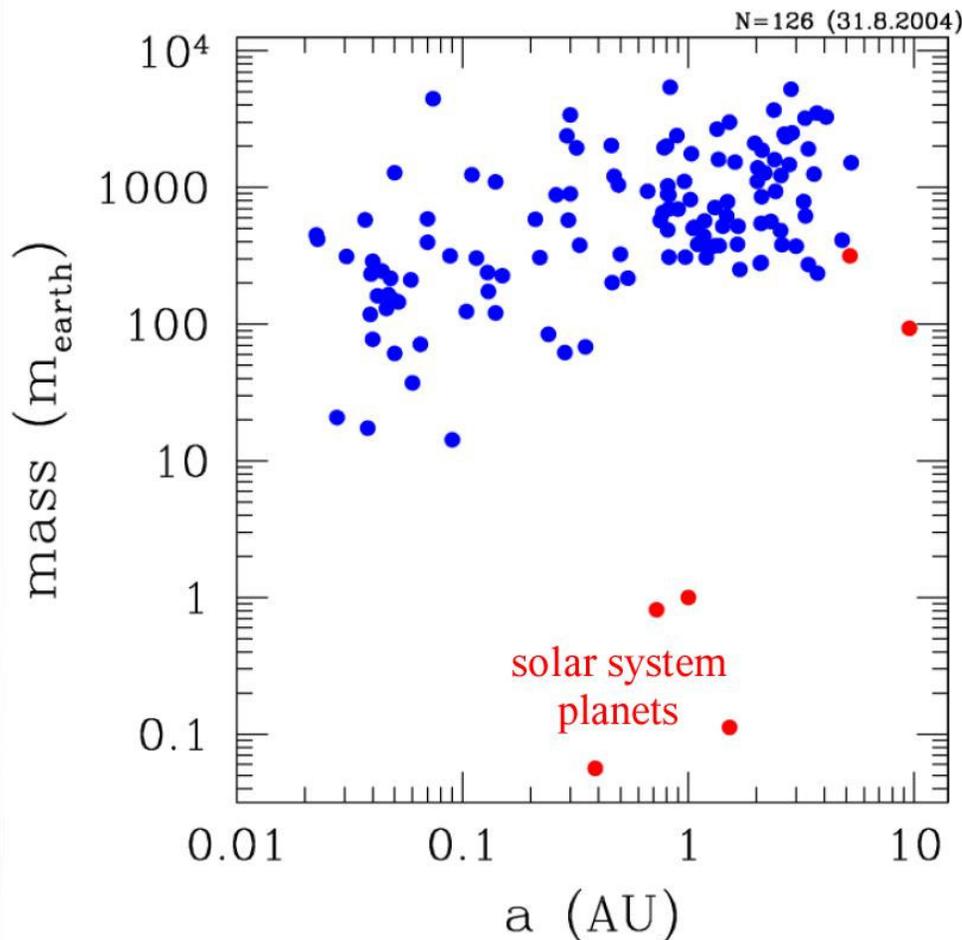
- Mayer et al. (2004) :
 - masse du disque : 0.07 - 0.125 M_{\odot}
 - taille du disque : 20 AU
 - fragmentation si $Q \equiv \frac{C_s \Omega}{\pi \Sigma G} \leq 1$



- Résultat :
 - formation de surdensités
 - sur un temps dynamique
 - masse \sim quelques M_J

Planètes extrasolaires & migration

Planètes géantes très proches de leur étoile centrale



Formation *In-situ* improbable :

● pas assez de masse (coeur)

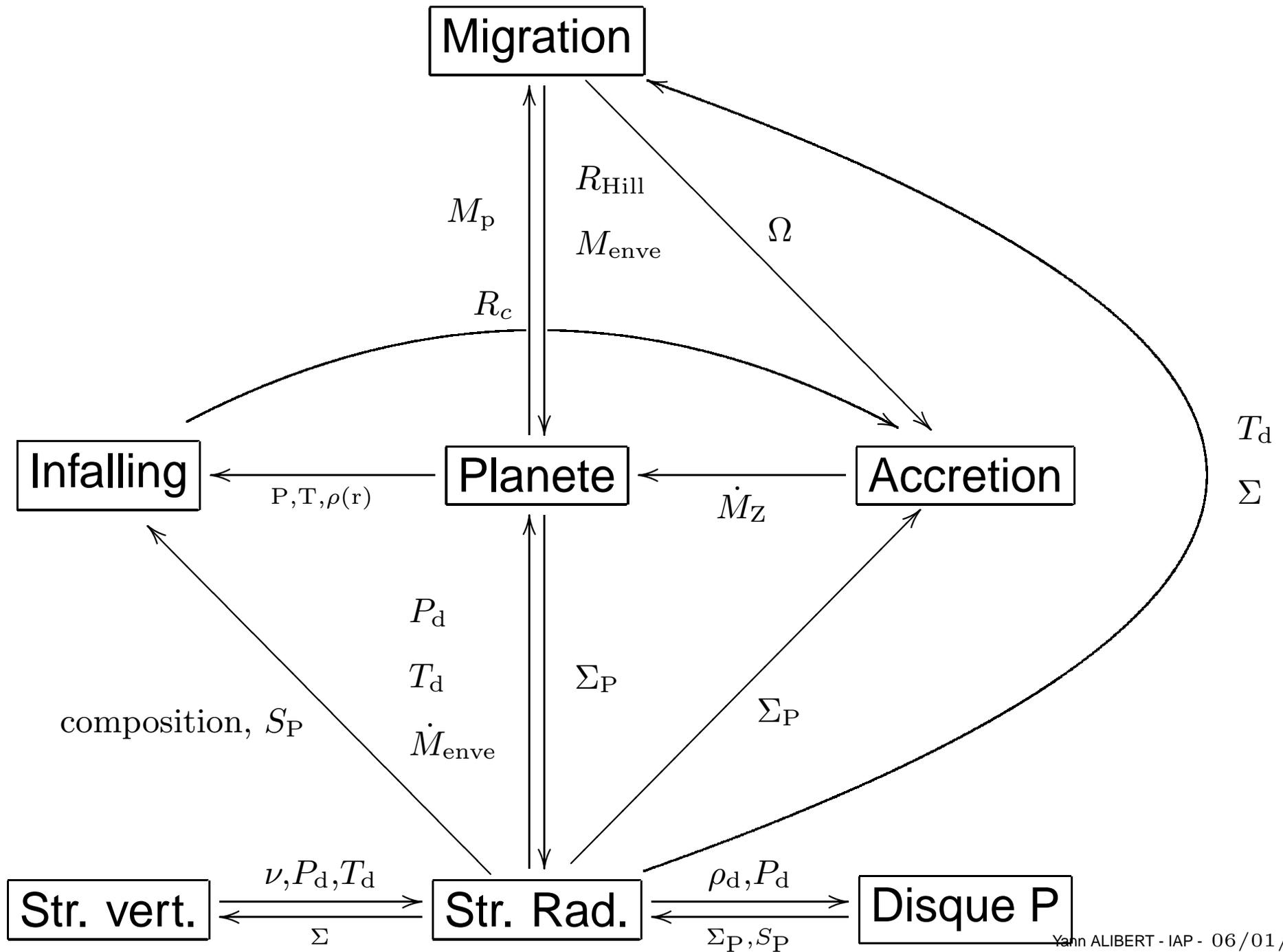
Σ_{solides} réduit pour $T > T_{\text{glaces}}$

● GI demande un petit paramètre de Toomre

⇒ **il faut de la migration !!**

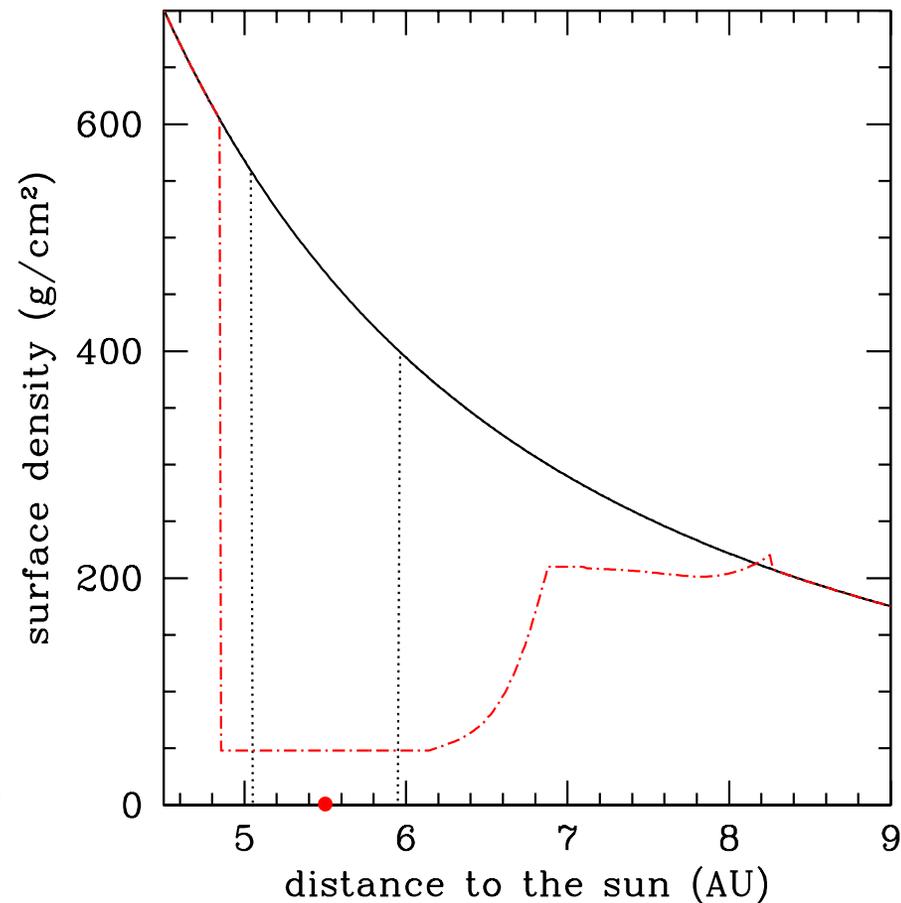
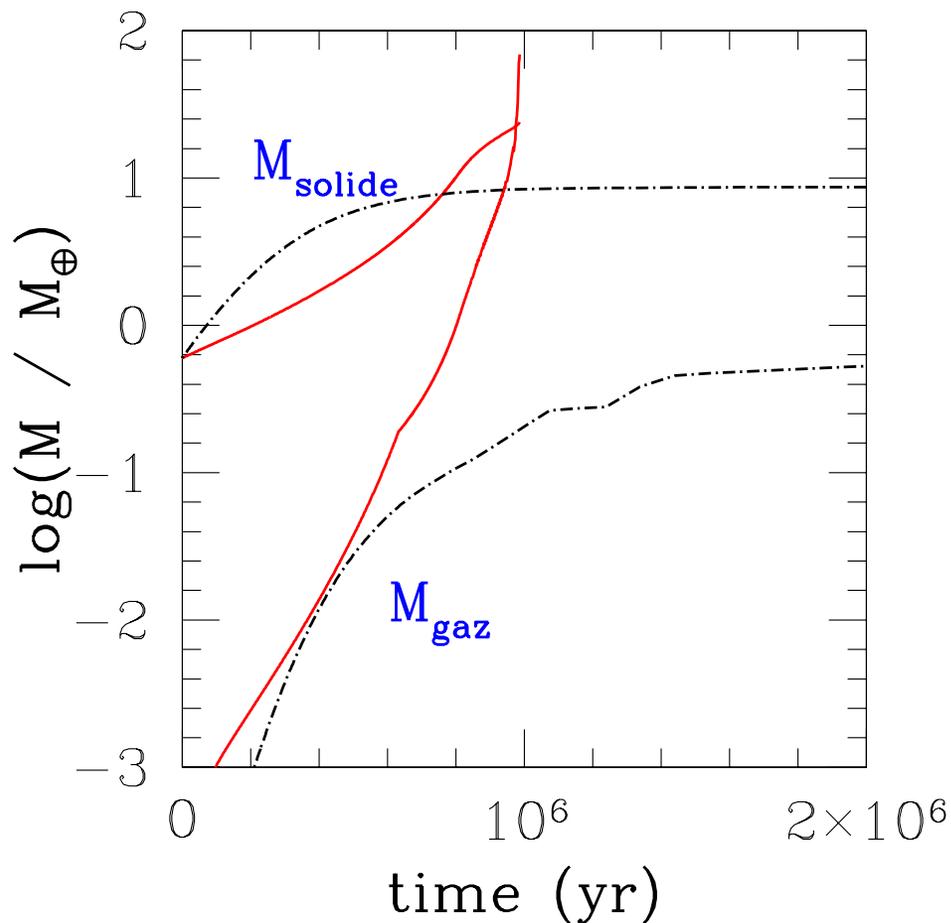
$$\tau_{\text{migration}} \sim 10^4 \longrightarrow \text{Mans}$$

Modèles étendus



Temps de formation

- Disque initial $\Sigma_P \propto r^{-2}$, $\Sigma_J = 7.5 \text{ g/cm}^2$ (modèle J2 de P96)
- $M_{\text{coeur}} = M_{\text{enve}}$ à 5.5 AU

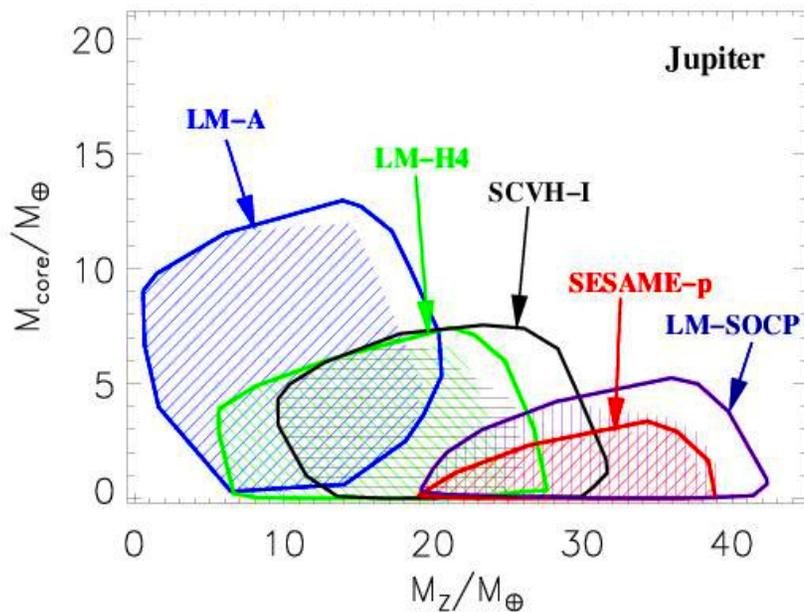


Alibert et al. 2004

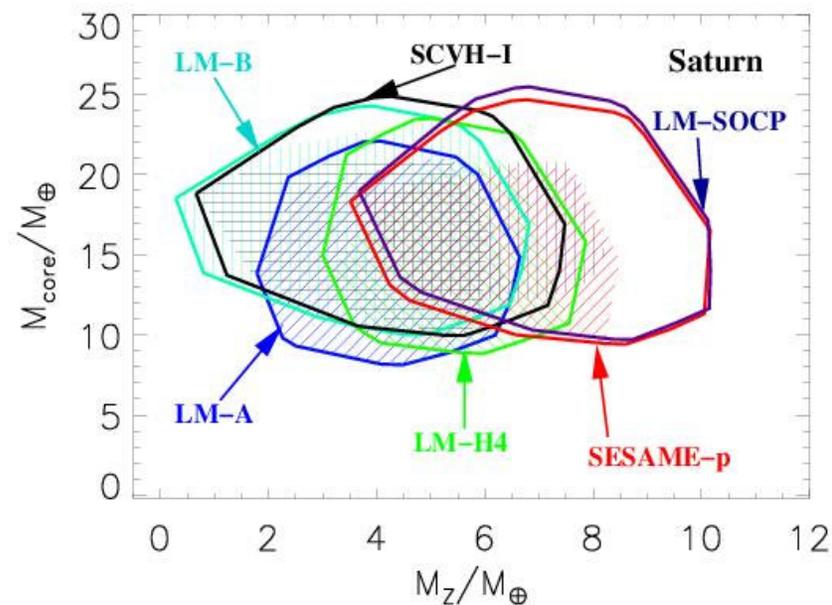
- Accélération par un facteur $\sim 30 - 40$

Jupiter et Saturne

● Structure interne



Saumon & Guillot 2004



● Composition atmosphérique : X/H comparé à solaire

C	3.7 ± 0.9	Ar	1.8 ± 0.4
N	3.2 ± 1.2	Kr	2.4 ± 0.4
S	2.7 ± 0.6	Xe	2.1 ± 0.4

Mahaffy et al. 2000; Wong et al. 2004

C	3.2 ± 0.8	C	8.1 ± 1.6
N	2.4 ± 0.5		
S	$\sim 12 ??$		

Brigg & Sackett 1989, Kerola et al. 1997

Flasar et al. 2005

Jupiter et Saturne

- Observations:

- Structure interne

- ↳ $M_{\text{coeur}}, M_{\text{planete}}, a_{\text{planete}}, Z \longrightarrow 8$

- Composition atmosphérique

- ↳ 8

- Degrés de liberté :

- Disque initial

- ↳ $M_{\text{disque}}, \tau_{\text{disque}} \longrightarrow 2$

- Conditions initiales

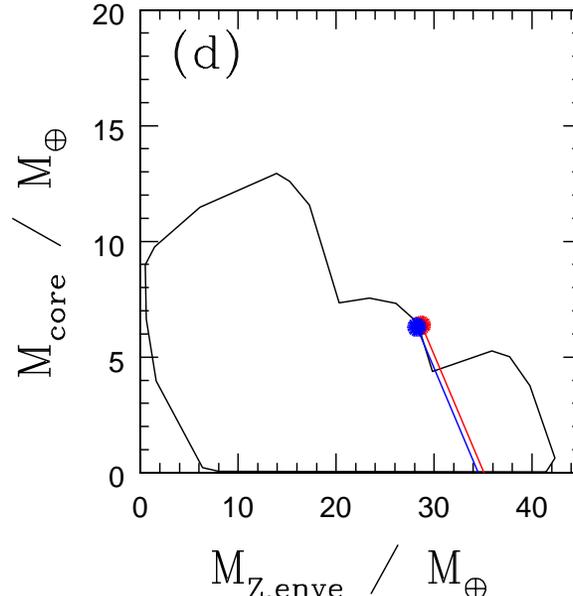
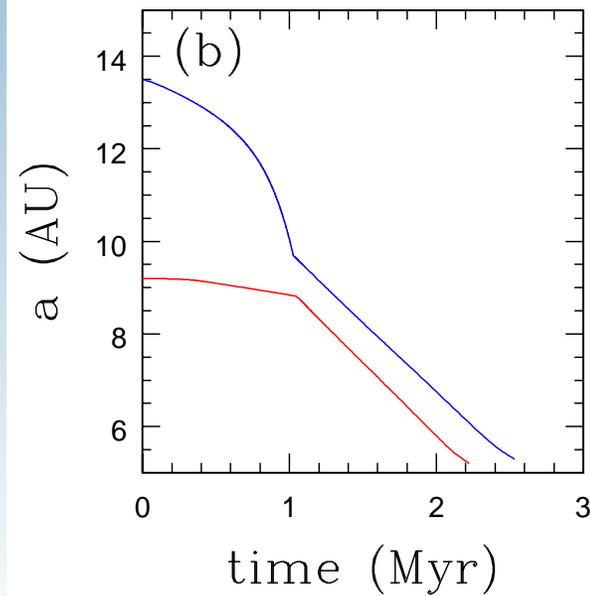
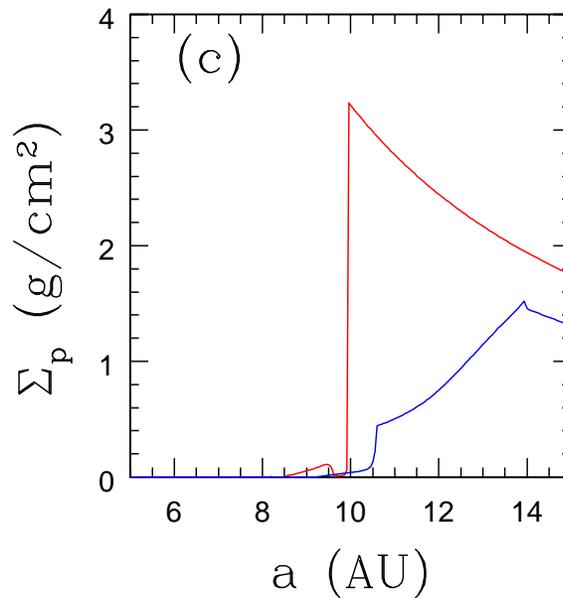
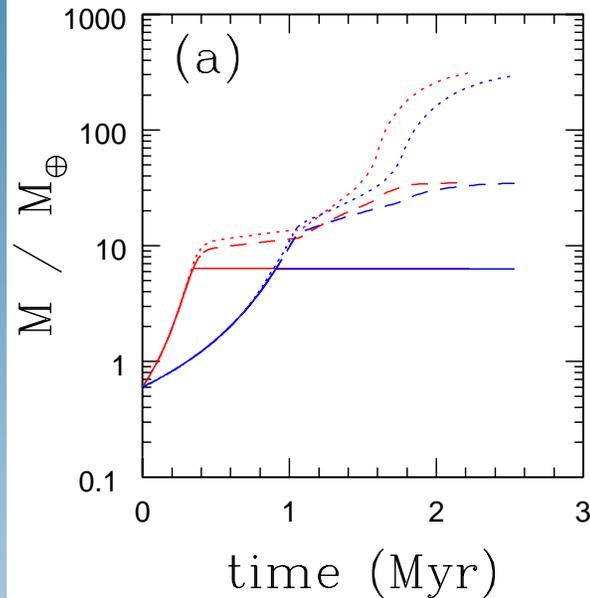
- ↳ $a_{\text{ini},J}, a_{\text{ini},S}, t_{\text{ini},S} - t_{\text{ini},J}, \longrightarrow 3$

- Inconnue : taux de migration de type I

Formation de Jupiter

faible taux de migration

fort taux de migration

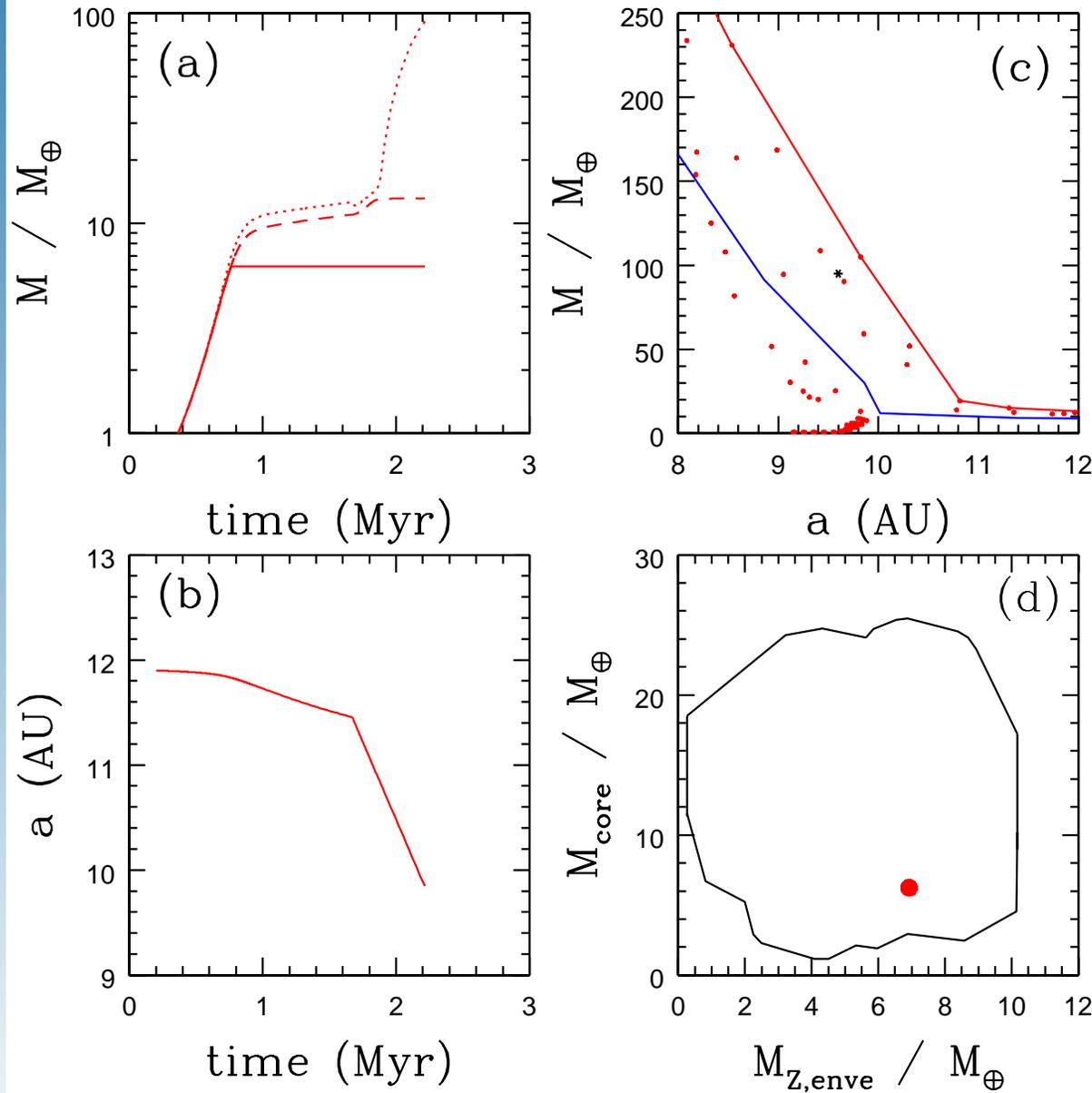


- masse finale $\sim 315M_{\oplus}$
- position finale ~ 5.2 AU
- $M_{Z,\text{tot}} \sim 35M_{\oplus}$
- $M_{\text{coeur}} \sim 6M_{\oplus}$
- $M_{\text{coeur}} =$ planétésimaux qui atteignent le coeur = valeur minimale ... à la fin de la formation

- point de départ ~ 9 à 14 AU
- masse du disque $\sim 0.05M_{\odot}$

$t_{\text{formation}} = t_{\text{disque}} \sim 2 - 3 \text{ Mans}$

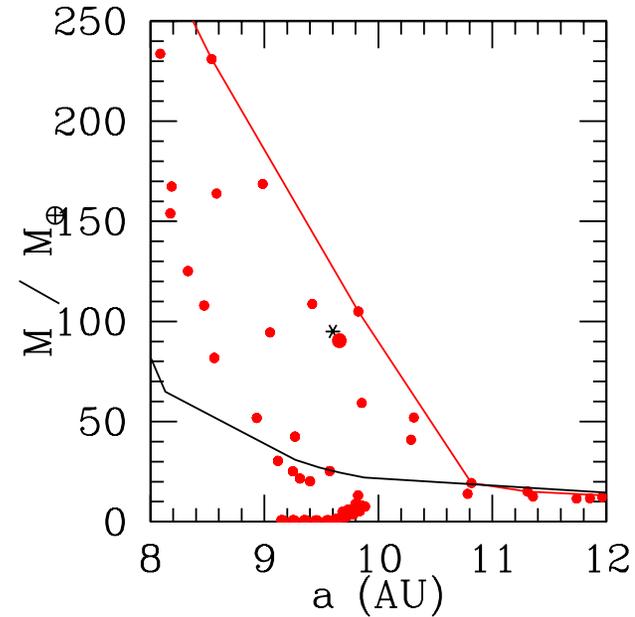
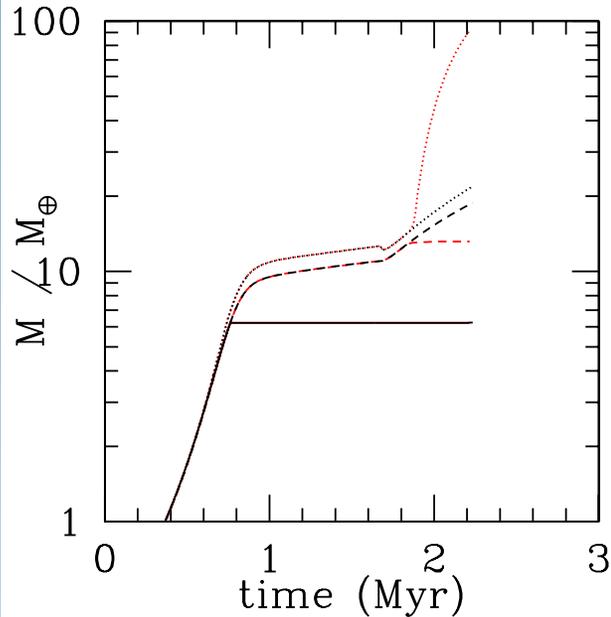
Formation de Saturne



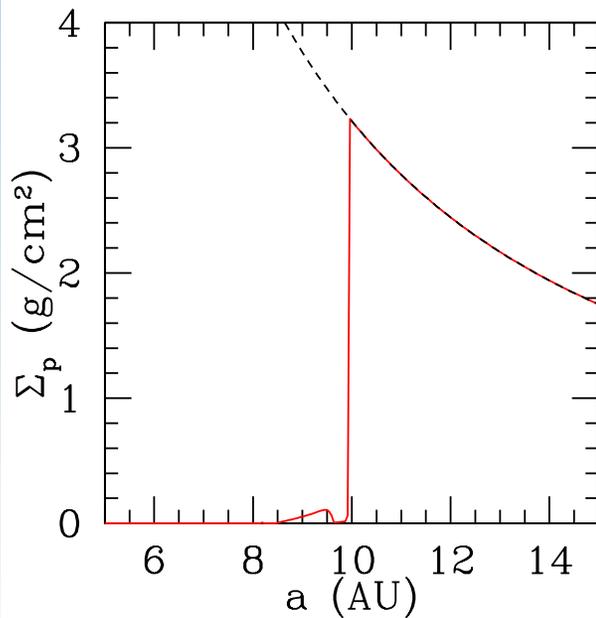
- faible taux de migration
 - ↳ point de départ ~ 12 AU
 - ↳ structure interne compatible avec les observations
- pas de Saturne avec un fort taux de migration
 - ↳ courbe bleue (c)

Alibert et al. 2005

Formation de Jupiter et formation de Saturne



A 10 AU



$$\Sigma_P \downarrow \implies \dot{M}_{\text{solides}} \downarrow$$

$$M_{\text{crit}} \propto \dot{M}_{\text{solides}}^{1/4} \downarrow$$

$$M_{\text{coeur}} > M_{\text{crit}}$$

runaway

$$M_p \uparrow \uparrow \uparrow$$

$$\Sigma_P \uparrow \implies \dot{M}_{\text{solides}} \uparrow$$

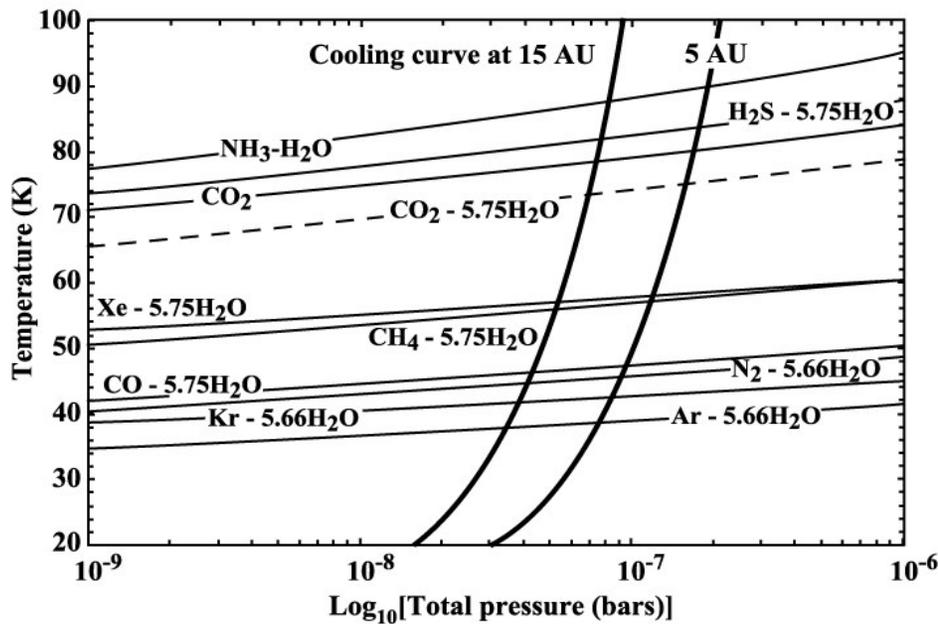
$$M_{\text{crit}} \propto \dot{M}_{\text{solides}}^{1/4} \uparrow$$

$$M_{\text{coeur}} < M_{\text{crit}}$$

pas de runaway

$$M_p \uparrow$$

Enrichissements en espèces volatiles



- P et T dans le disque
- ⇒ composition des planetesimaux
- Modèle de formation
- ⇒ composition globale

Espèce	Observé	Calculé
Ar	1.8 ± 0.4	2.
Kr	2.4 ± 0.4	2.1
Xe	2.1 ± 0.4	2.6
C	3.7 ± 0.9	2.8
N	3.2 ± 1.2	2.5
S	2.7 ± 0.6	2.1

Alibert et al. 2005

Espèce	Observé	Calculé
Ar		1.7
Kr		1.9
Xe		2.3
C	3.2 ± 0.8	2.4
N	2.4 ± 0.5	2.2
S		1.9

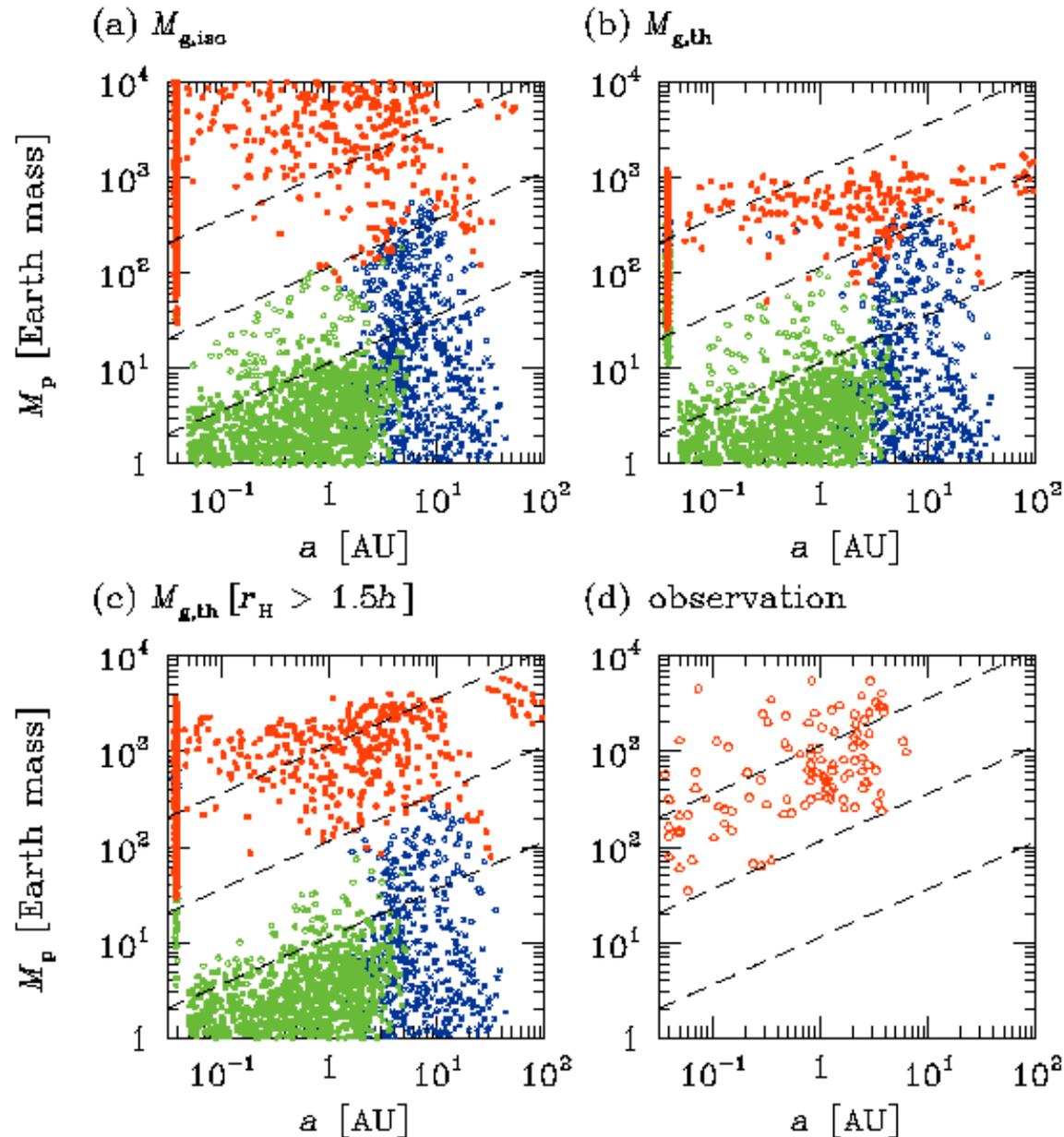
Mousis et al. 2005

Planètes extrasolaires

- Très grande diversité résultant probablement des CI :
 - Disque protoplanétaire
 - Composition du gaz
 - Environnement
- Pour expliquer les observations, il faut prendre en compte
 - 1) les CI, avec leur lois de probabilité,
 - 2) les biais observationnels.

⇒ approche Monte-Carlo

Monte Carlo : Ida & Lin 2004,2005



● Géantes
($M_{env}/M_{coeur} > 10$)

● Glacées
($M_{env}/M_{coeur} < 10$)

● Rocheuses
($M_{env}/M_{coeur} < 10$)

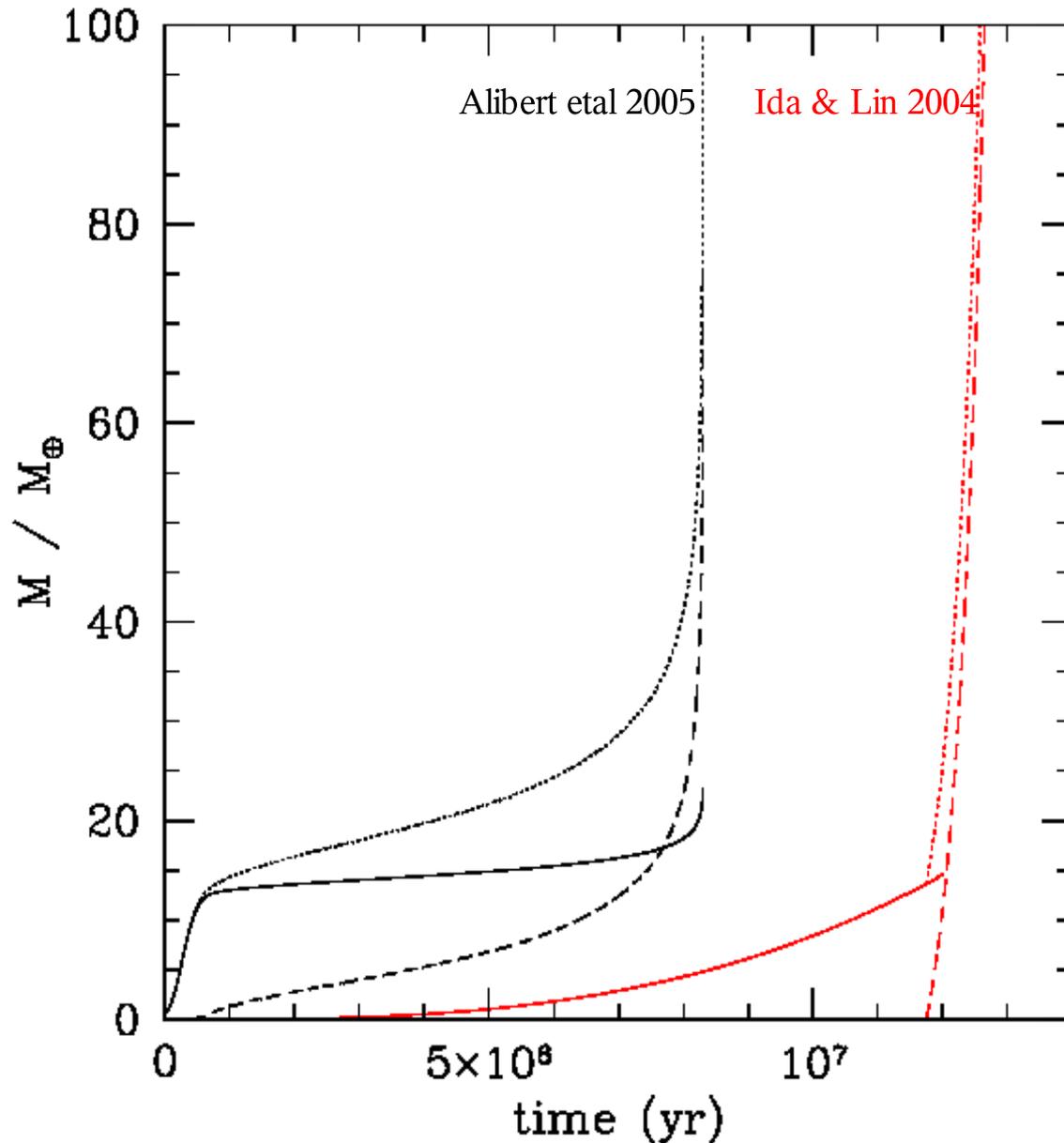
➡ séparation des types

➡ "planet desert"

➡ effet de Fe/H

Différences dans les modèles de formation

Cas J1 de Pollack et al. 1996



- ↳ P96/A05 \neq IL04
- ↳ \neq non systématique
- ↳ pas testés sur le SS
- ↳ rapides à calculer

Monte-Carlo : conditions initiales

- Disque protoplanétaire
 - masse totale, structure initiale ($\Sigma \propto r^{-3/2}$)
 - métallicité
 - taux de photoévaporation
 - paramètre de viscosité (α)
 - ↳ temps de vie
- Planète
 - position initiale
 - date du début de formation
- Planétésimaux
 - taille (100 km)
 - propriétés physiques (glace)

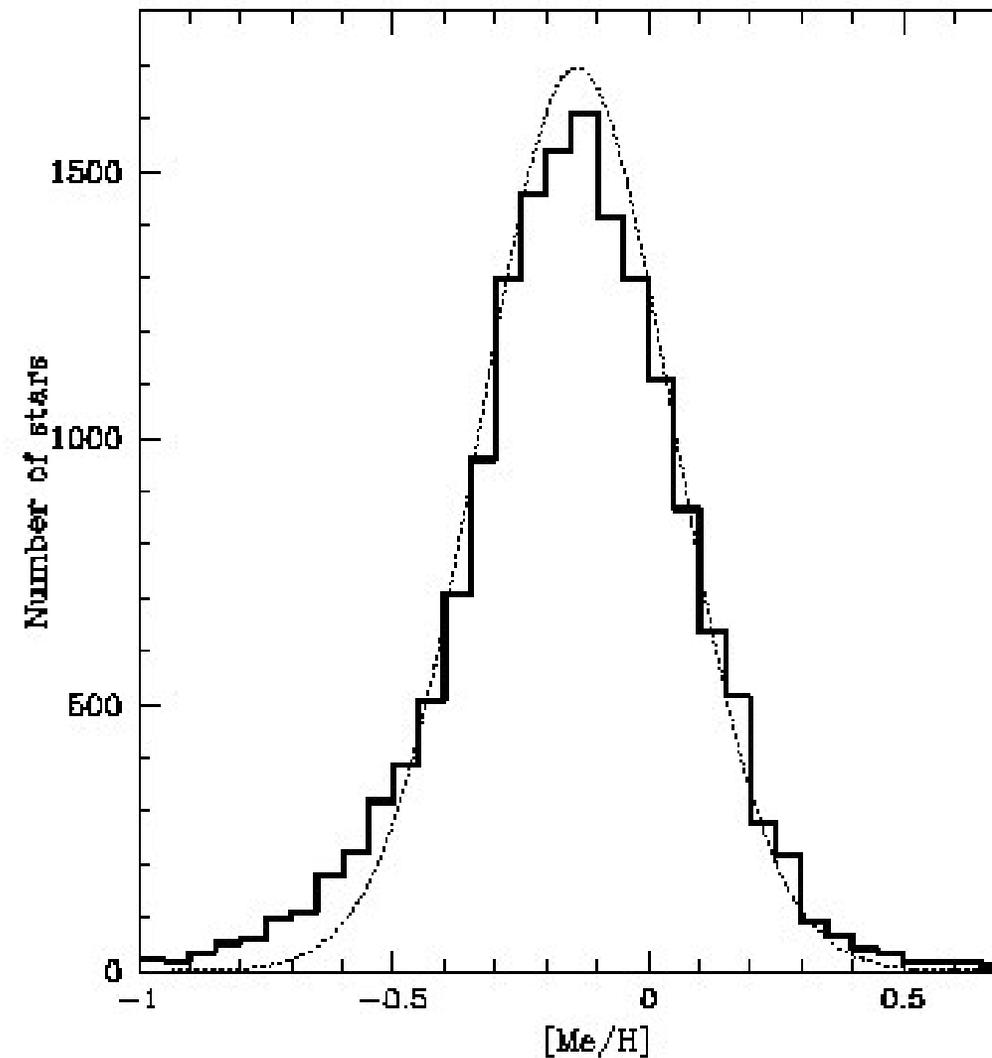
Propriétés des disques : métallicité

~ 14000 étoiles F et G
(voisinage solaire)

↳ répartition gaussienne

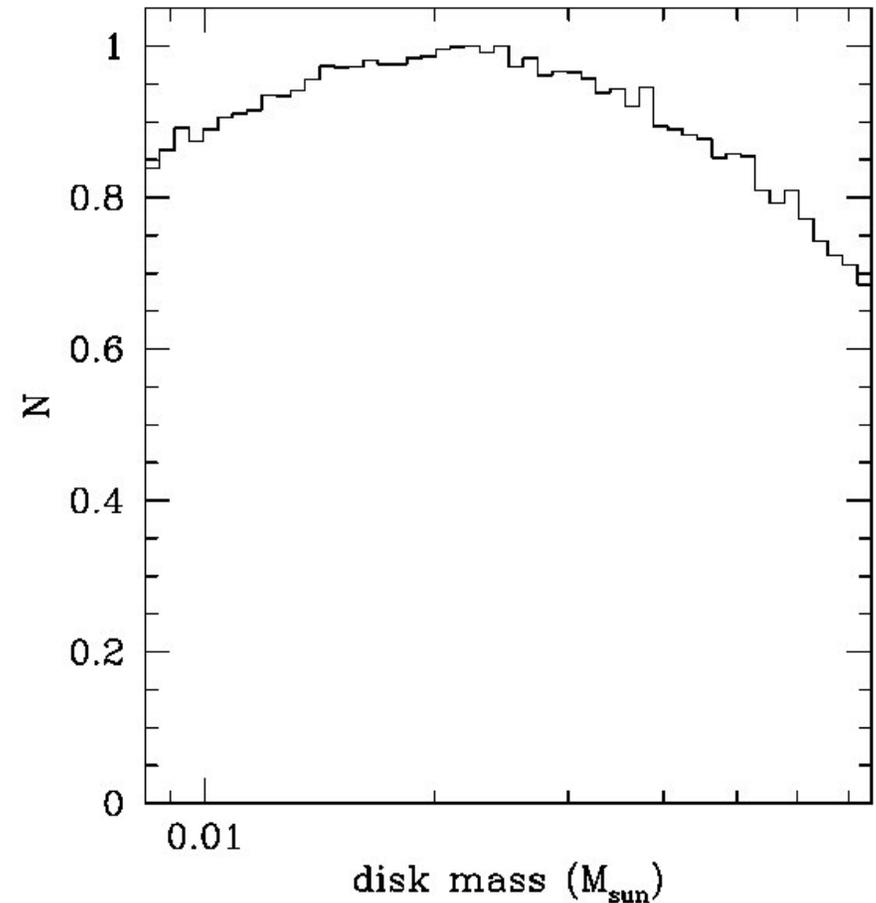
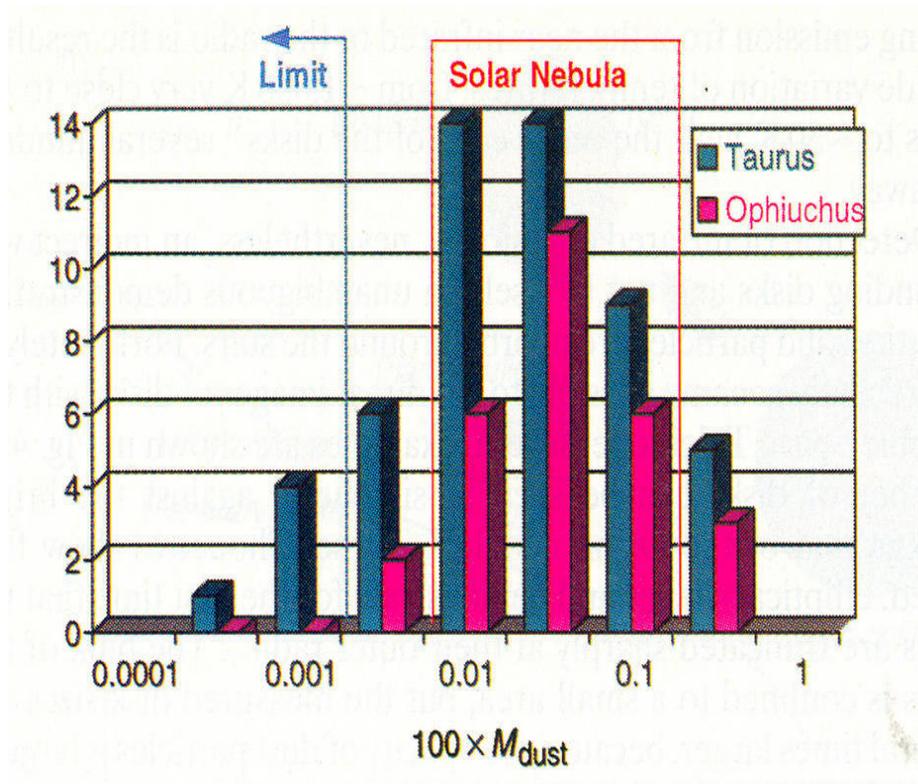
$$\mu = -0.14$$

$$\sigma = 0.19$$



Nordström et al. 2005

Propriétés des disques : masse



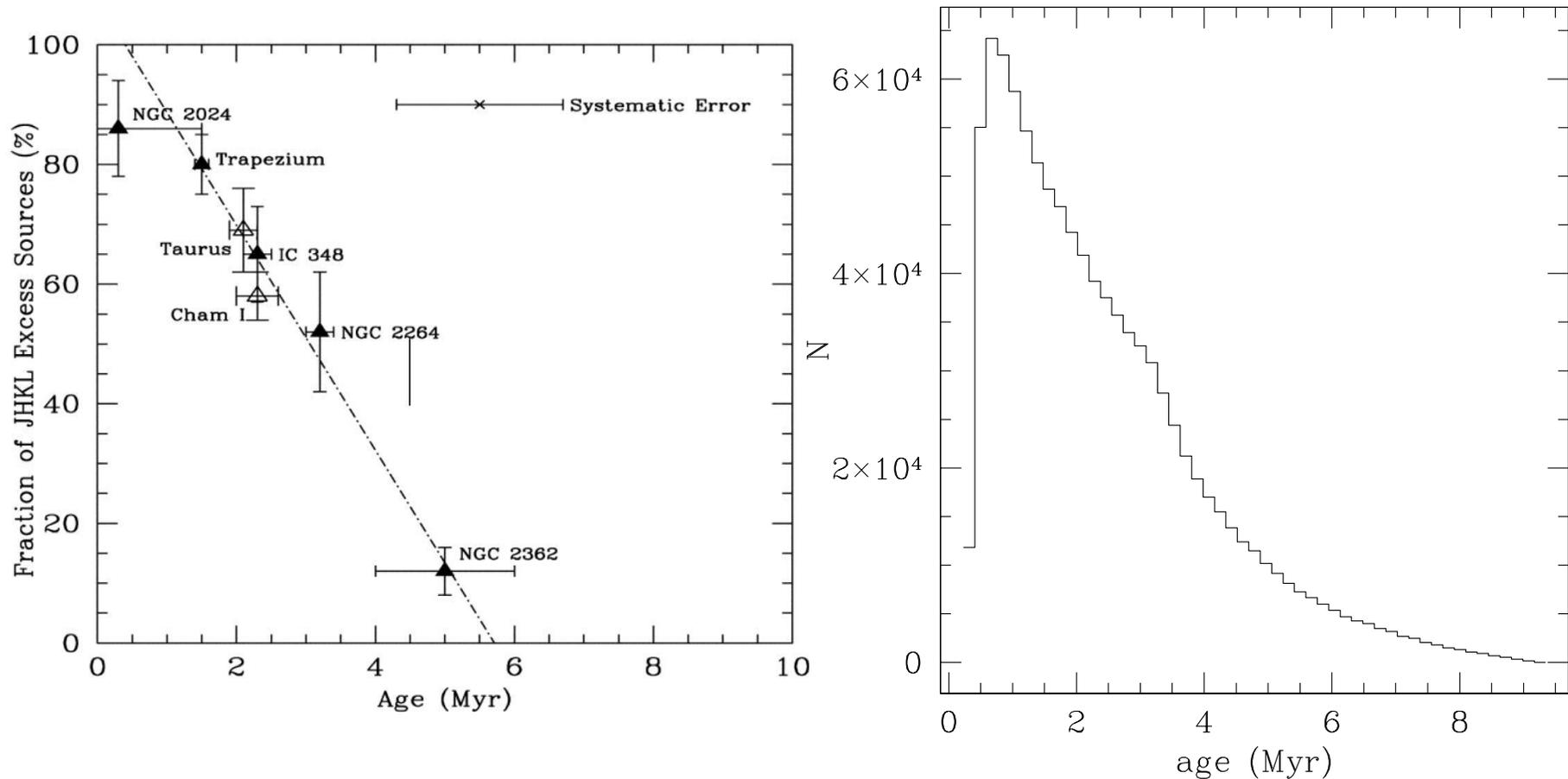
densité de surface du gaz :

$$\Sigma \propto \Sigma_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\frac{3}{2}} \implies M_{\text{disque}} = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} 2\pi r \Sigma(r) dr$$

$$\hookrightarrow a_{\min} = 0.25 \text{ AU}$$

$$\hookrightarrow a_{\max} = 30 \text{ AU}$$

Propriétés des disques : temps de vie



taux de photoévaporation :

$$\rightarrow \sim 3 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr} < \dot{M}_W < \sim 1.5 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$$

Monte-Carlo : conditions initiales

- métallicité :

$$Fe/H = -0.4, Fe/H = -0.07, Fe/H = 0.16, Fe/H = 0.3$$

- masse du disque : 5 valeurs

$$\text{gaussien en } \log \Sigma_0, \mu = 2.42, \sigma = 0.74$$

- point de départ des embryons : 10 valeurs

uniforme en $\log a$, entre 1 et 20 AU

- taux de photoévaporation : 10 valeurs

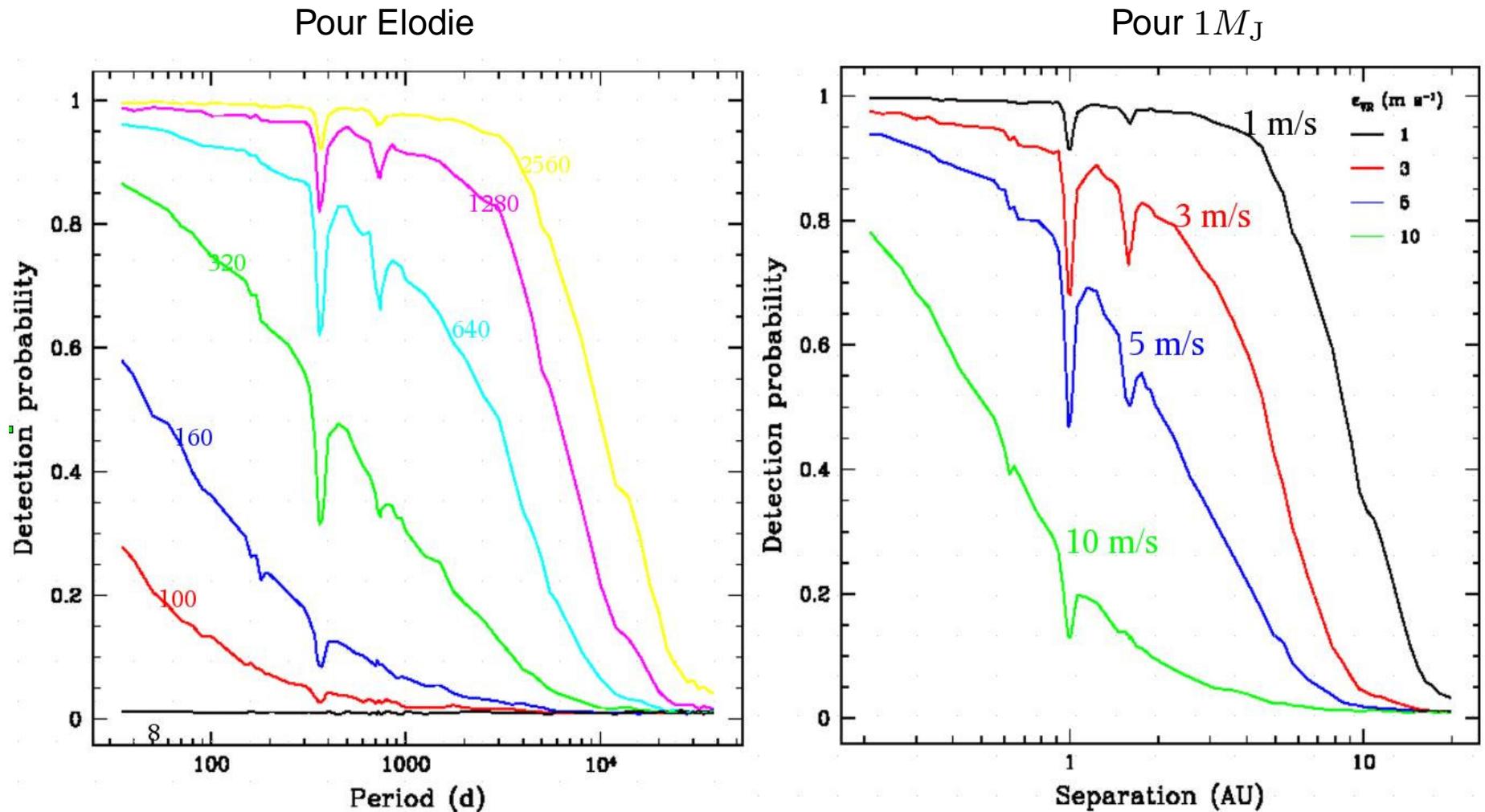
uniforme entre $3 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$ et $1.5 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$

- temps de départ : 4 valeurs

uniforme entre 0 et 4 M_{ans}

➔ $4 \times 5 \times 10 \times 10 \times 4 \sim 8000$ modèles ~ 20000 heures

Biais observationnel

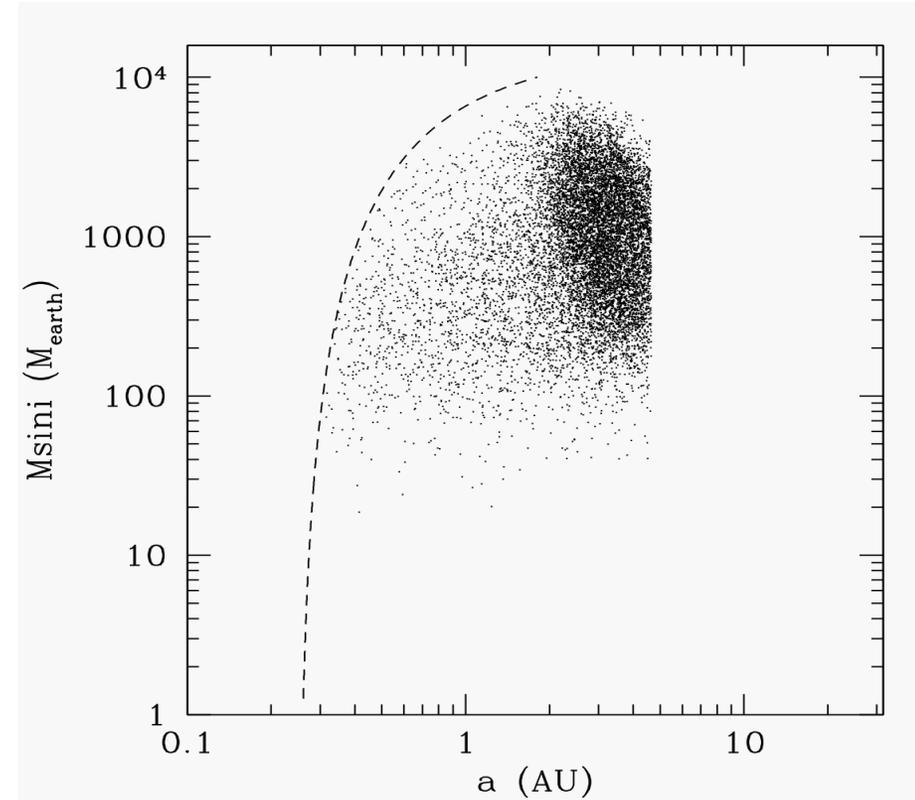
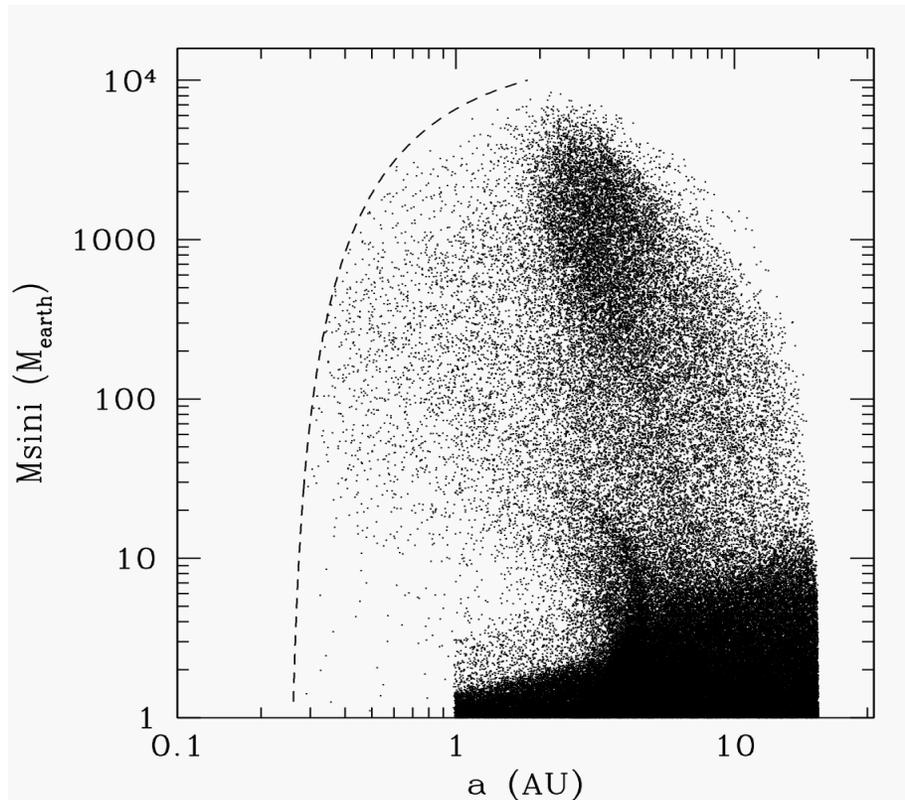


Simulations Monte-Carlo par D. Naef

eccentricité, masse, période, programme d'observations

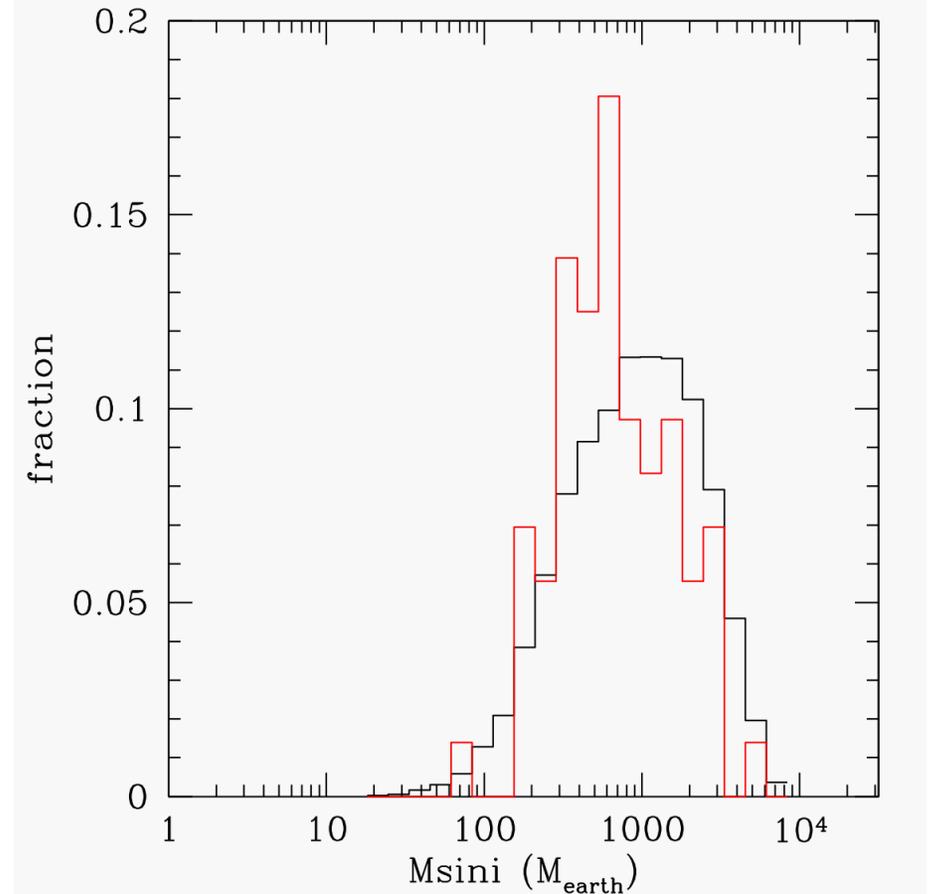
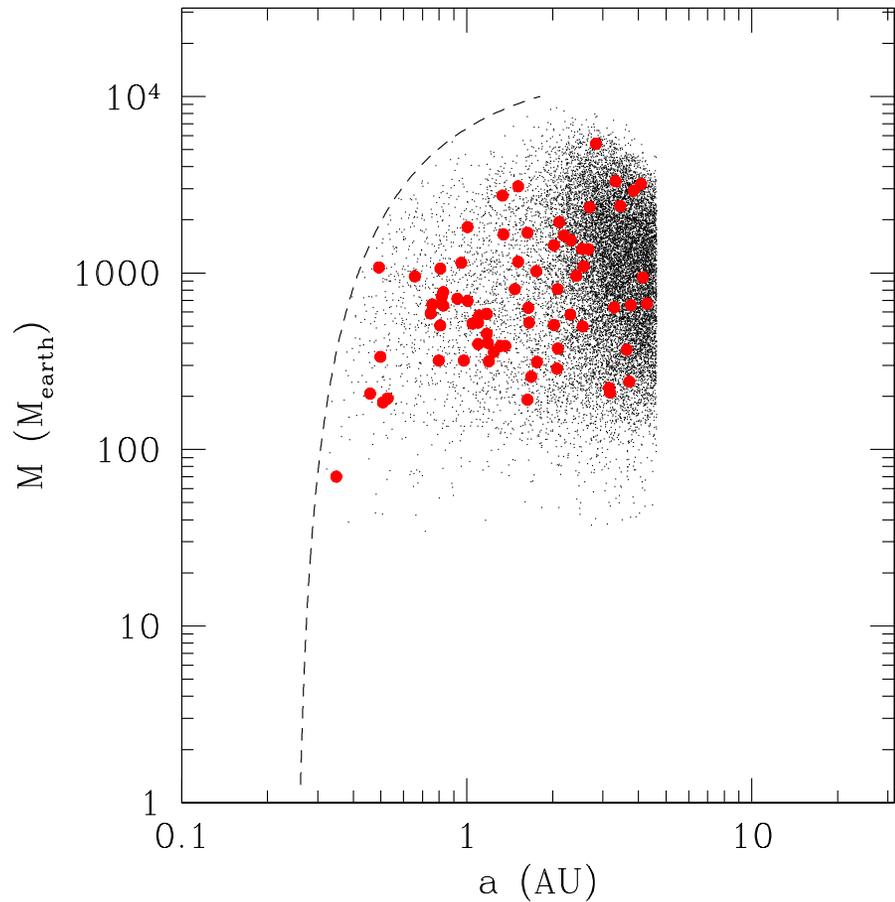
↳ **biais observationnel**

Biais observationnel



- la plupart des embryons ne deviennent pas des géantes
- seule la partie émergée de l'iceberg est détectable

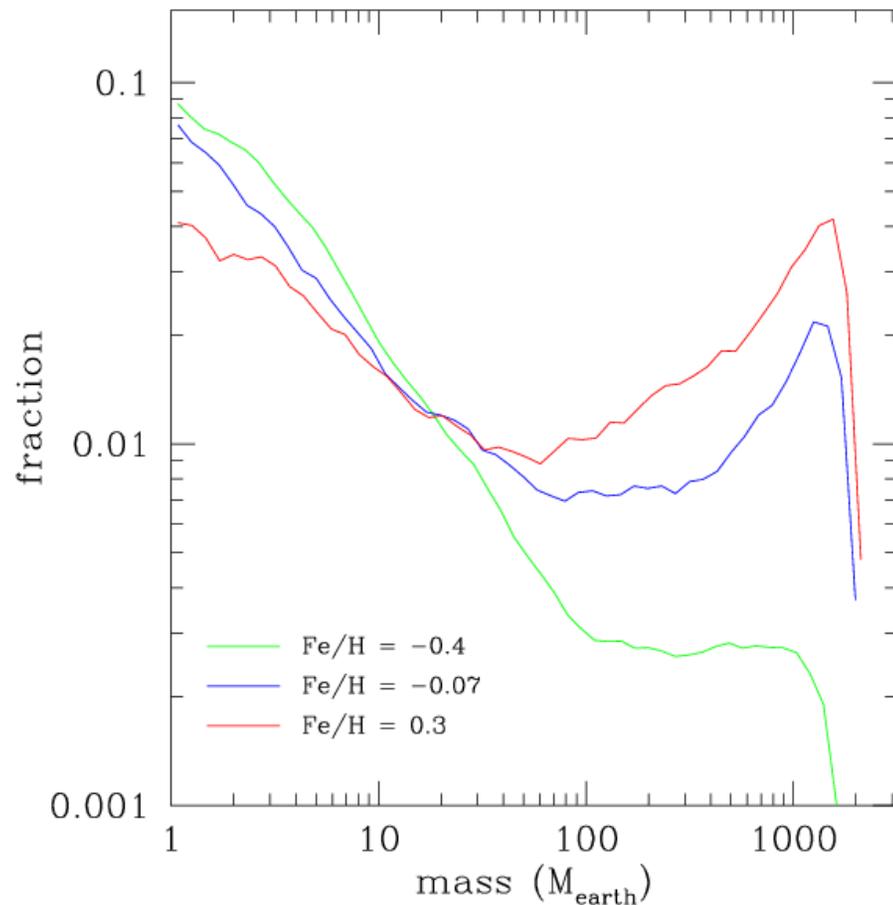
$M \sin(i)$ VS a



- masses légèrement trop élevées
- migration sous-estimée

Effet de métallicité

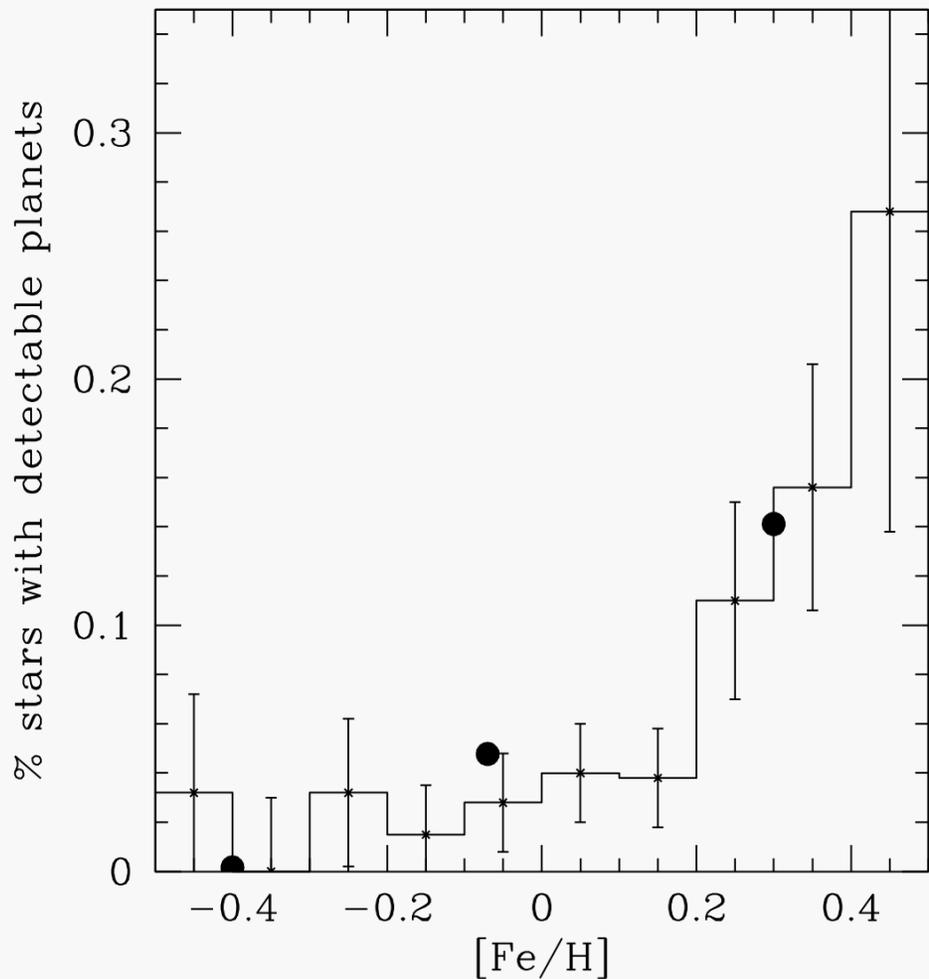
Sans biais observationnel



↳ planètes massives plus nombreuses dans les systèmes riches en métaux

Effet de métallicité

Avec biais observationnel



- Effet de métallicité :
 - 1) les planètes massives se forment dans les disques riches en métaux
 - 2) les techniques de détection actuelles empêchent l'observation de planètes peu massives

Conclusions

- Temps de migration, evolution du disque & formation comparables
 - ↳ prise en compte des 3 effets dans les modèles de formation
 - ↳ plus de problème d'échelle de temps
- Modèles étendus
 - ↳ formation de J & S *dans le même disque*
 - ↳ formation des exoplanètes, approche MC
- Amélioration des modèles :
 - déposition de masse par les planétésimaux
 - migration dans les modèles MC
 - modèles de disques plus réalistes (gaz & solides)