

# La Formation des Planètes



Sébastien Charnoz  
Cours AIM  
Université Paris 7 & CEA Saclay

## *Préambules...*

---

→ La théorie de formation planétaire est une **théorie jeune et en plein développement**,  
(bien moins mature que celle du Big-Bang , par exemple)  
(Safronov : 60's, Greenberg, Wetherill, Weidenschilling : 80-90's,  
et... la foule depuis 1995)

→ Une théorie **multi-disciplinaire**  
qui fait appel à tous les domaines de la physique  
(à part la physique des particules) (hydrodynamique, Gravité, simulations numériques,  
chimie, physique des surfaces, géologie, expériences de laboratoire, datation radio-active,  
transfert-radiatif, physique de la fracturation etc..., photo-chimie)



Multiplicité des outils

→ L'objet de l'étude ne cesse de se transformer, de changer  
de nature



Multiplicité des objets

1. **Contraintes** (observations, données etc..)
2. **Premières théories modernes**
3. **Modèle actuel**
4. Une **Histoire** de *notre* Système Solaire
5. **Nouveaux Systèmes Planétaires**

# 1. Contraintes

→ Qu'est ce qu'un Système Solaire ?

**Une étoile entourée  
d'une ou plusieurs planètes et de petits corps**  
.... Définition évasive...

→ Combien en connaît-on ?

1 très bien : **Notre Système Solaire**

Et ....

12 systèmes de  
planètes-extrasolaires :  
Epsilon Andromède, 47 UMA, ...  
+  
En tout 209 exoplanètes (2006)  
20 systèmes planétaires multiples

.... Mais pas  
d'observation  
directe

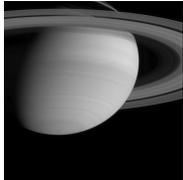
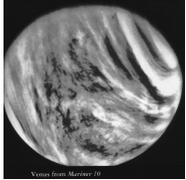
Le scénario de formation planétaire sera donc très « biaisé » en faveur de notre système solaire (sur-abondance d'information)

⇒ Difficulté :

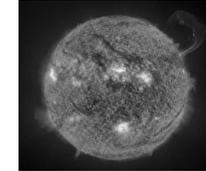
Trier ce qui nous est **spécifique** de ce qui est **général**

⇒ Nouvelles techniques d'observation (IR, transits, Doppler) :  
Tests et confrontation des **modèles** avec les **observations**

# Composants de notre Système-Solaire :



➤ 1 étoile centrale : Le Soleil  
et un cortège de 8 (9) planètes



➤ Une population *très diverse* de satellites



➤ Deux ceintures d'astéroïdes :  
1 interne et 1 externe (Kuiper)

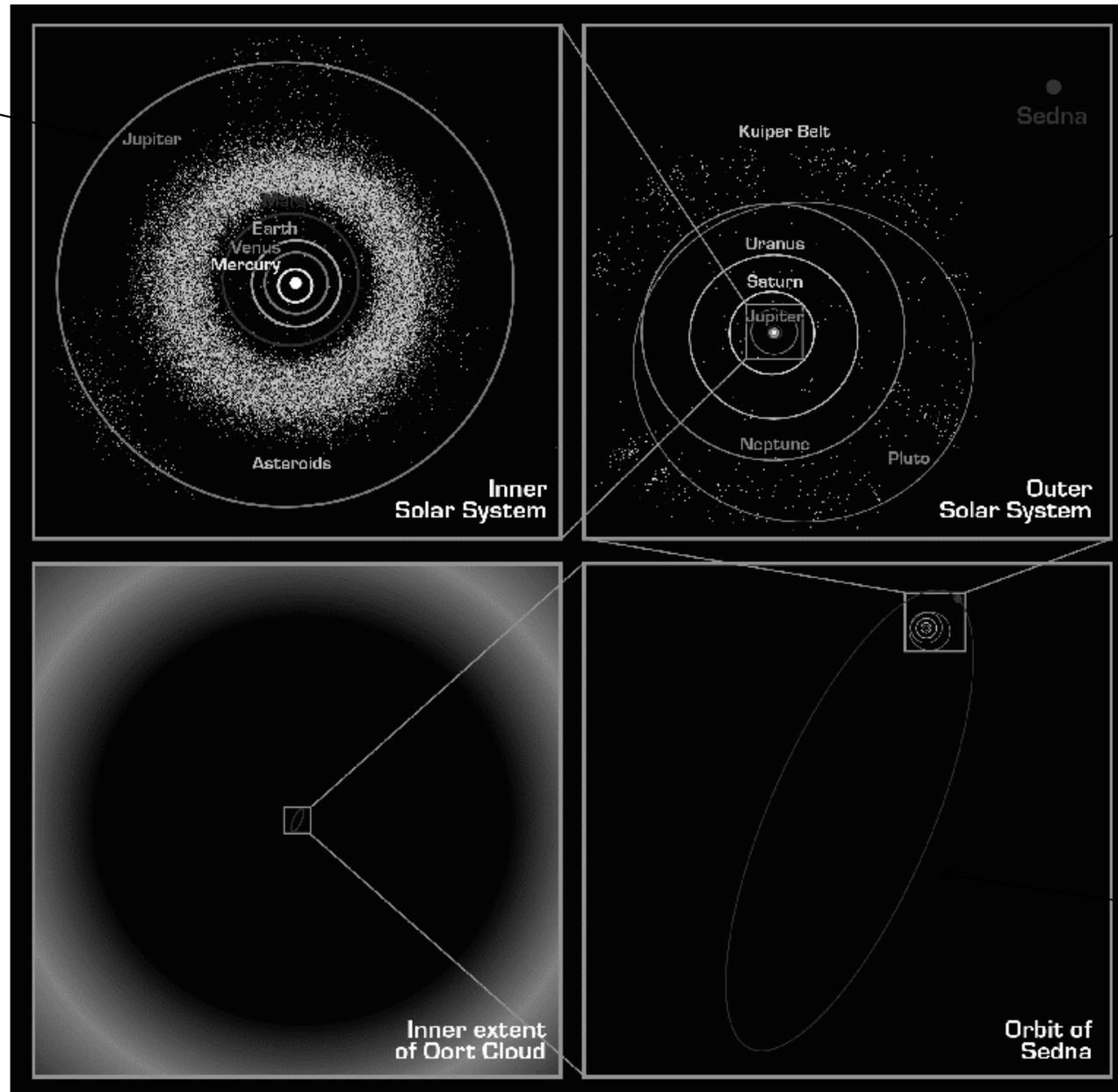
➤ Des comètes très à l'extérieur



➤ Pas de gaz

# Portrait de famille du Système Solaire

5 ua



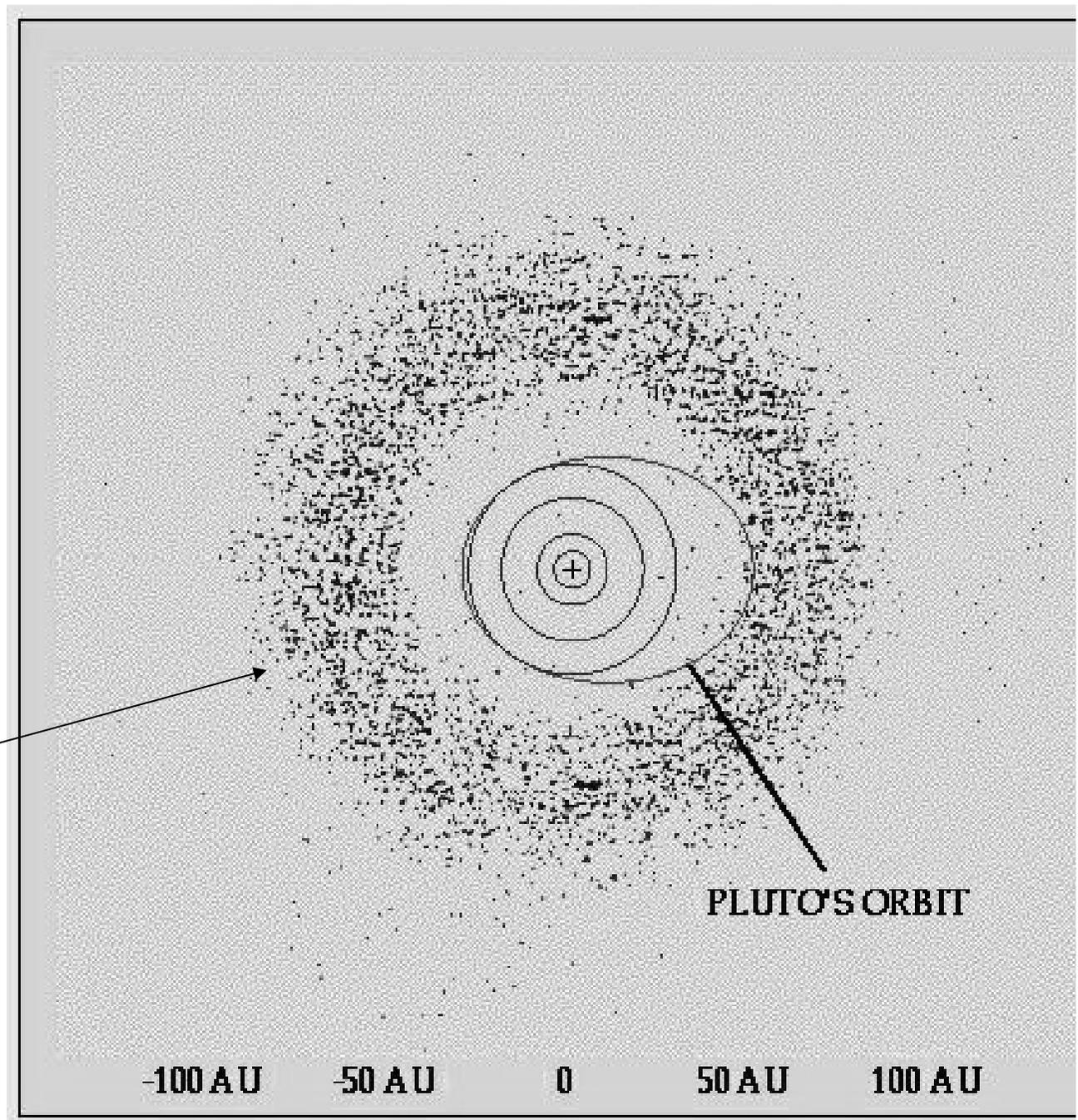
40 ua

Sedna  
 $a=500$  ua  
 $e=0.8$

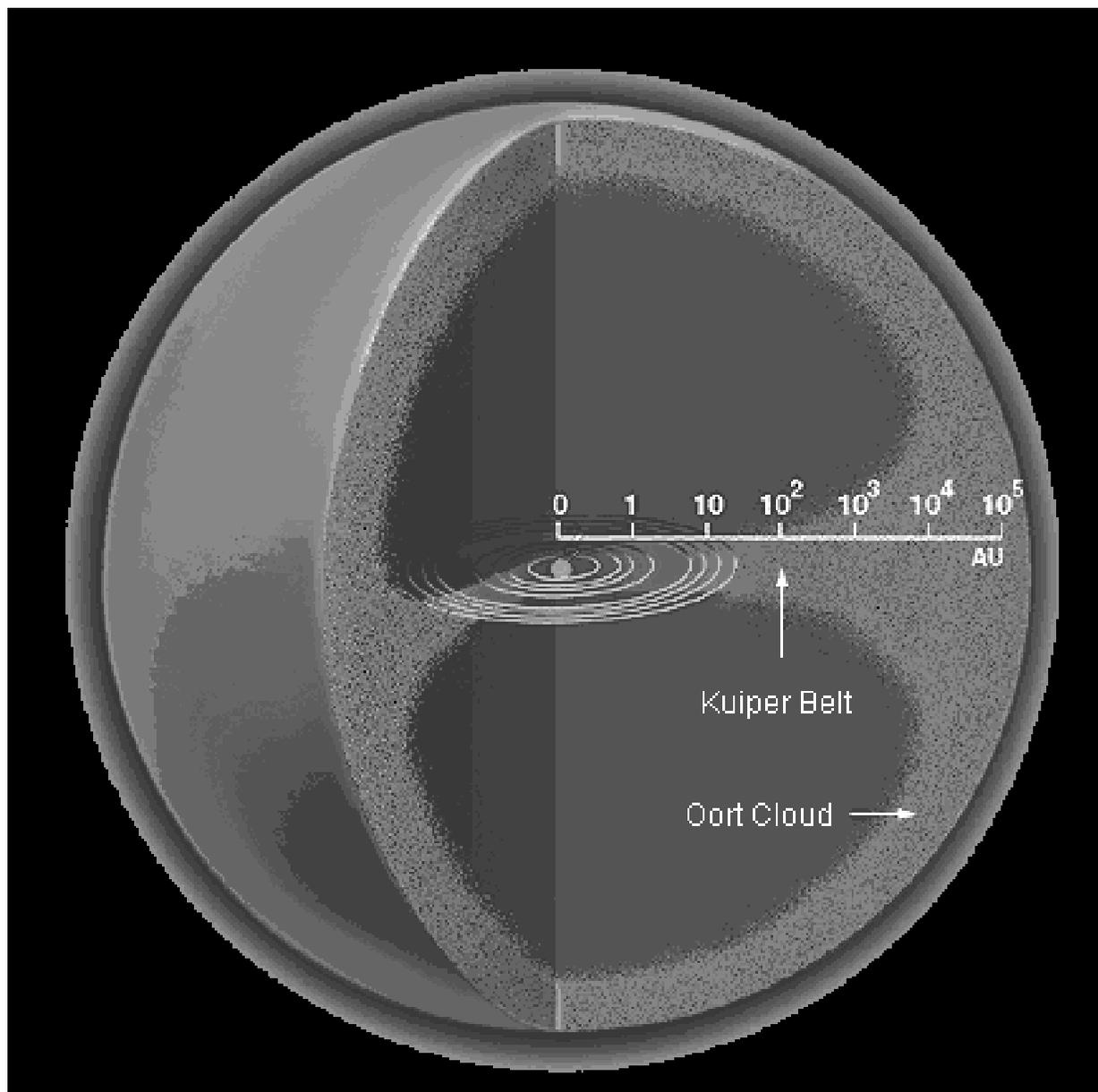
Plus à l'extérieur :

Une 2ème ceinture dite de « Kuiper »

50 au



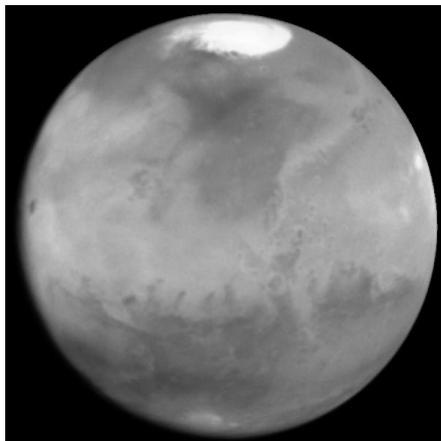
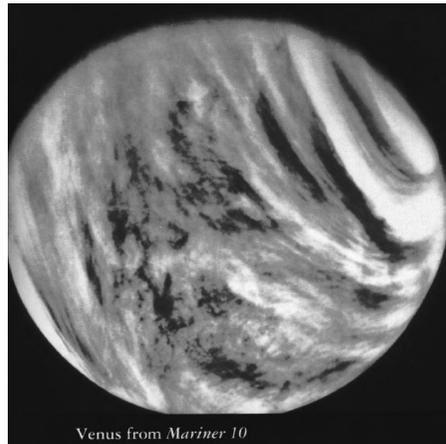
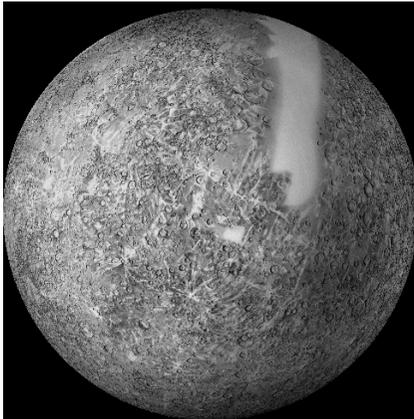
Encore plus loin : le nuage d'Oort  
lieu de résidence des comètes (à longue période)



# Grands faits à expliquer

Différenciation chimique interne/externe

Planètes internes (< 3 UA) **petites et faites de roches et de métaux**

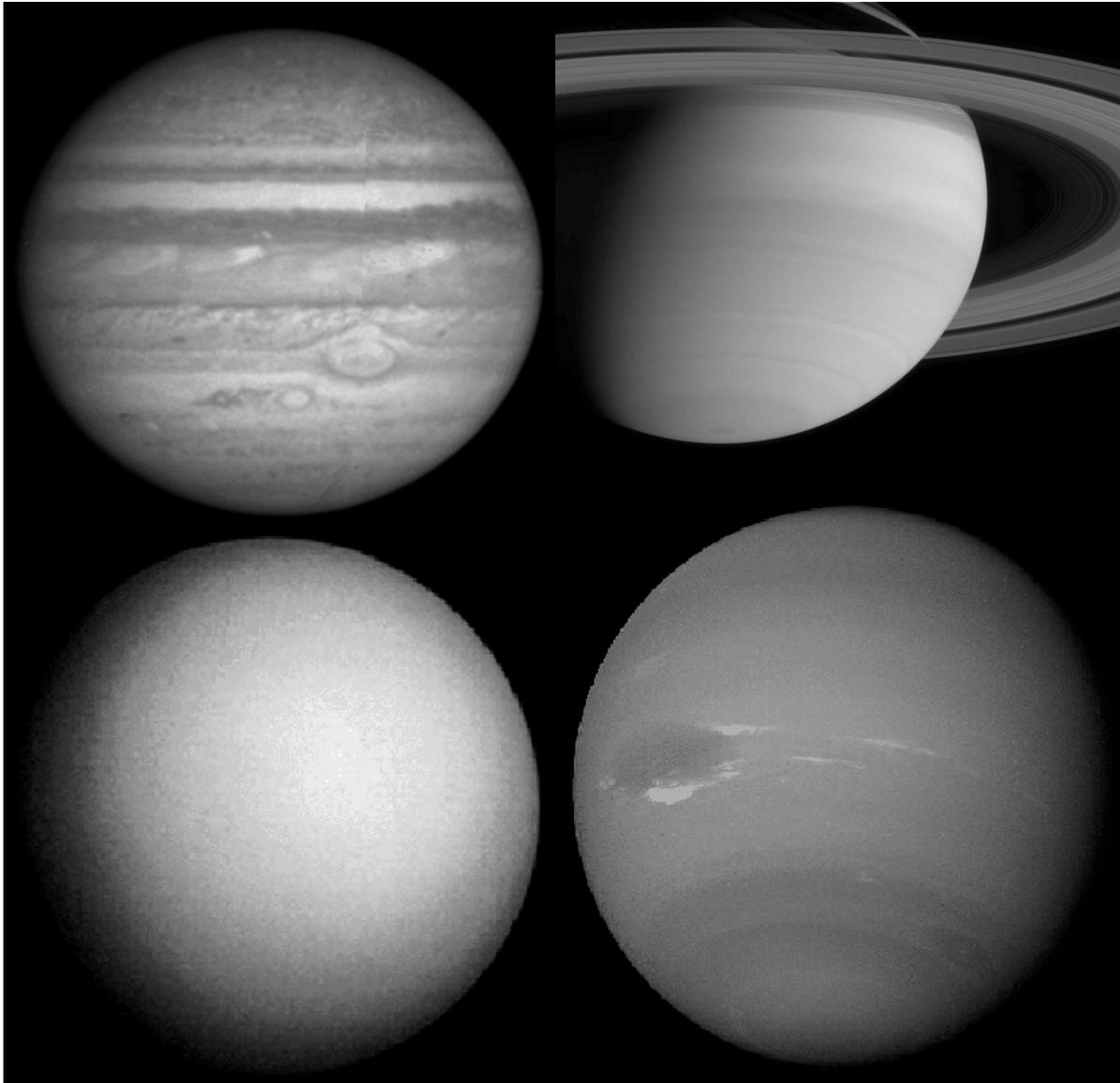


Eléments réfractaires (condensent à haute température)

Pas de volatils

Grands cratères , plus grands sur mercures

## Planètes externes (> 5 UA) géantes et composées de volatils



15 à 300 x la masse  
de la terre

Volatils (gaz+glaces)

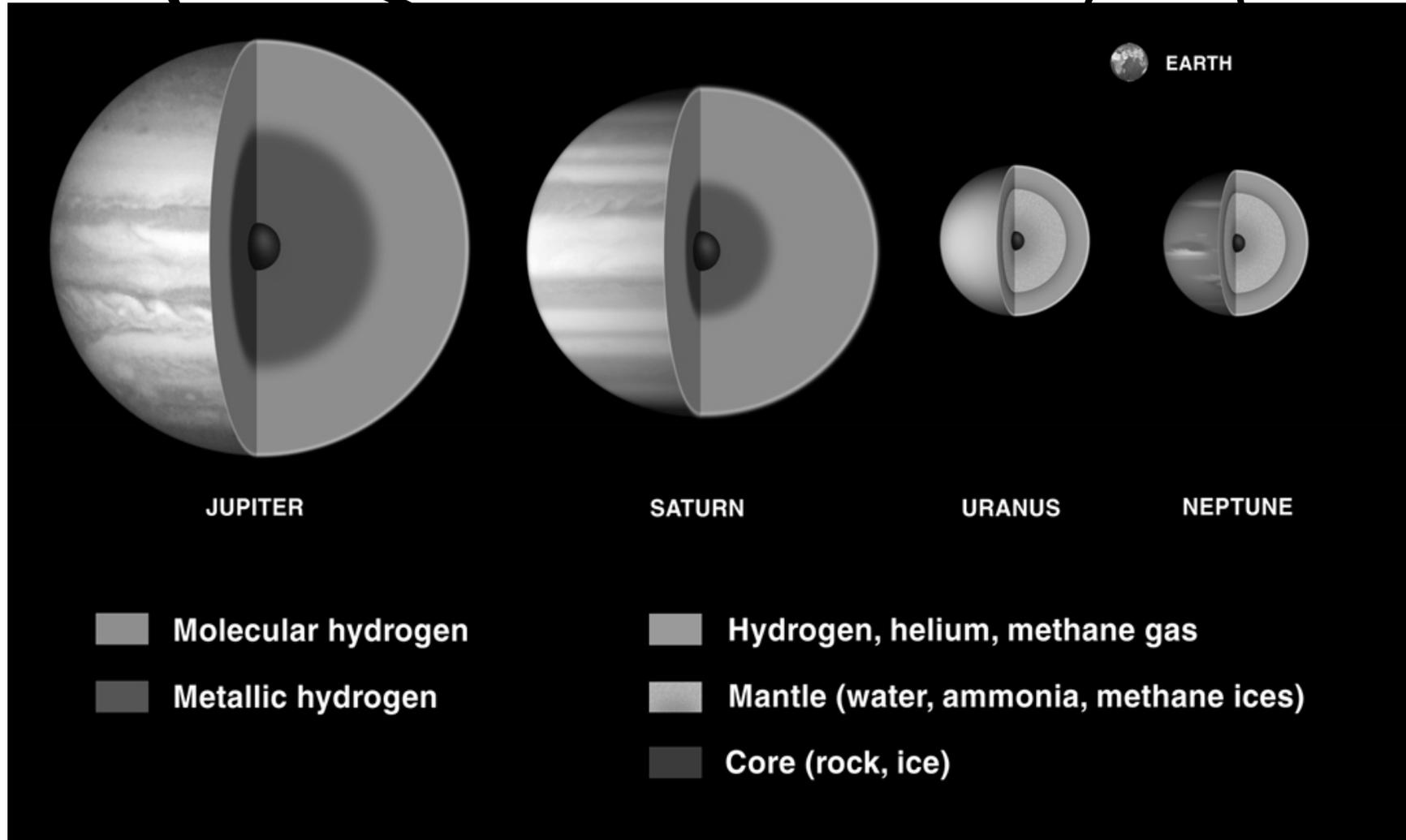
Atmosphère :

~ 4-5 fois la métallicité  
du Soleil

*Toutes les planètes géantes ne sont pas les mêmes*

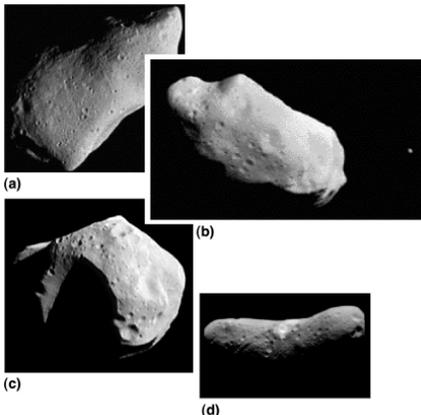
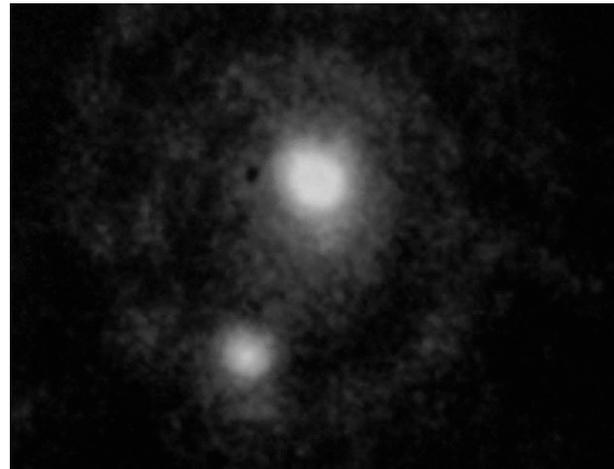
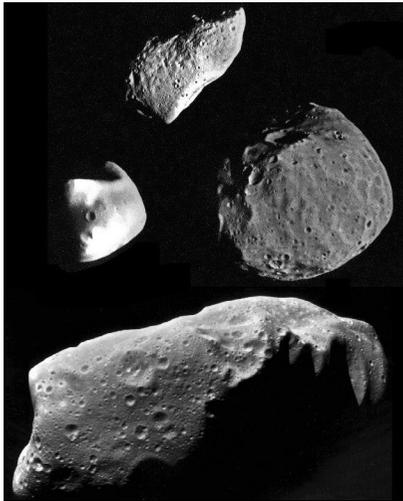
Géantes de gaz

Géantes de glaces

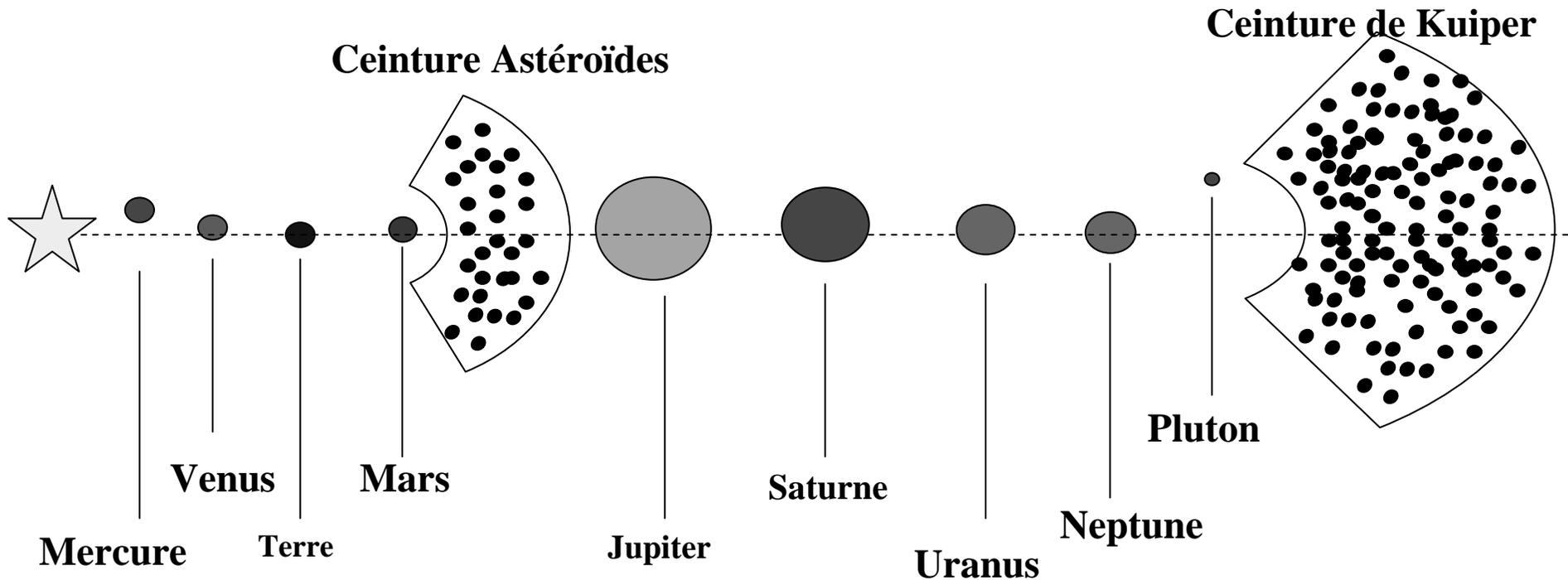


# Les petits corps (1 à 200 km) sont répartis :

1. Dans la ceinture d'astéroïde (3 UA)
2. Dans la ceinture de Kuiper (40 UA)
3. Dans le nuage d'Oort (comètes) ( $10^4$  UA)
4. Piégés autour des planètes (Phoebe)

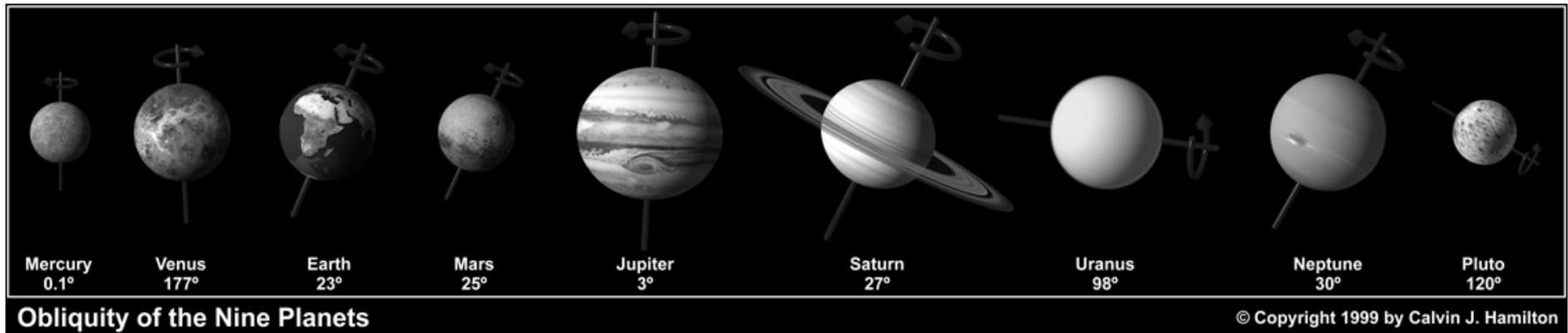


Les planètes ne n'orbitent pas n'importe où :  
près de plan de Laplace (! ecliptique = Terre)



=> Fortes inclinaisons et excentricités dans les ceintures de petits-corps >> planètes

Les planètes tournent ~ toutes dans le même sens



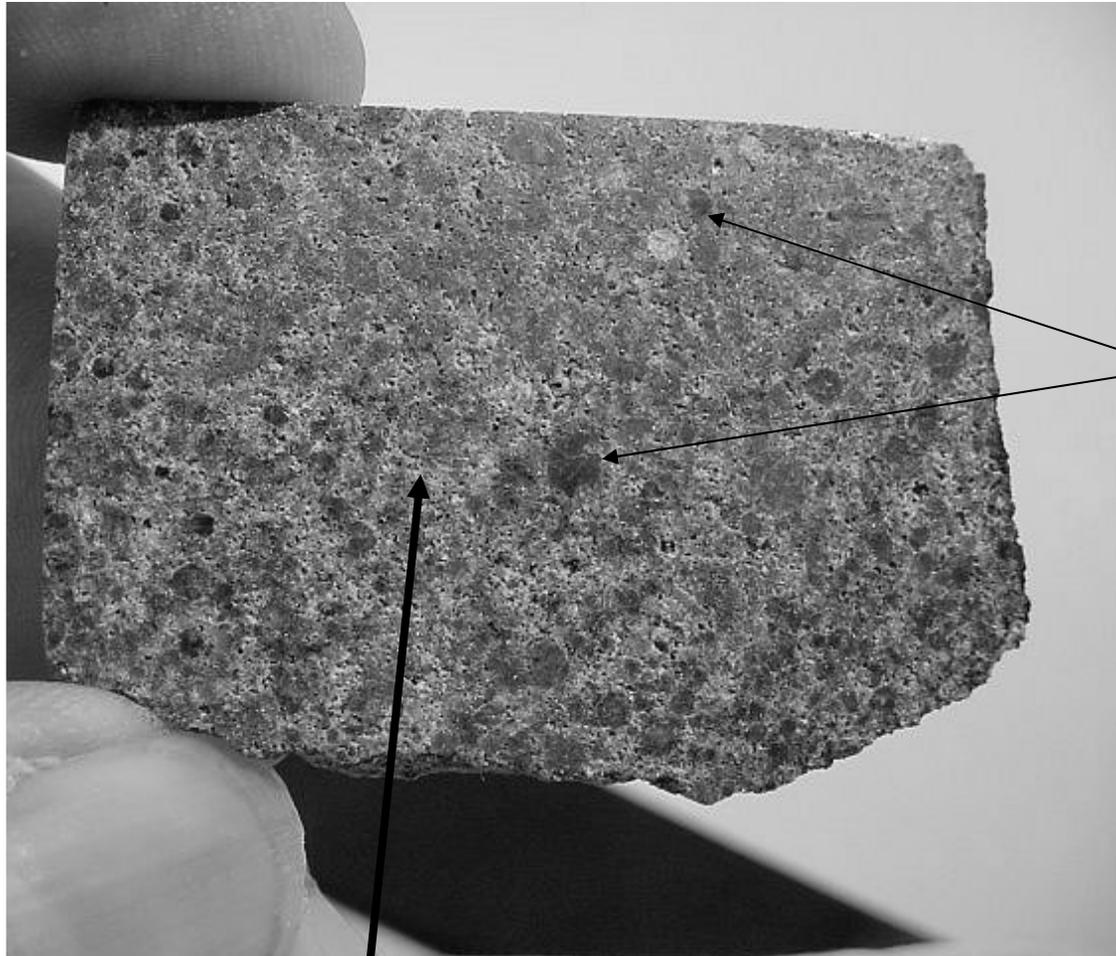
Exceptions notoires : Venus , Uranus

# La Masse et le Moment Cinétique Ne sont pas répartis également

	<b>SOLEIL</b>	<b>PLANETES</b>
<b>MASSE</b>	<b>99 %</b>	<b>1%</b>
<b>Moment Cinétique</b>	<b>1%</b>	<b>99%</b>

# L'information thermique et chronologique contenue dans les météorites

## Matrice & Chondrules



## Les Chondrules

- Gouttelettes de silicates
- Formation?? =>  $T > 1600\text{k}$
- Formation process is still unclear!
- Composition solaire  
(Chondrules+ matrices)

Datation radio-active Ur-Pb :  
Demie-vie :  $7 \times 10^9$  ans

$4.566 - 4.556 \times 10^9$  ans

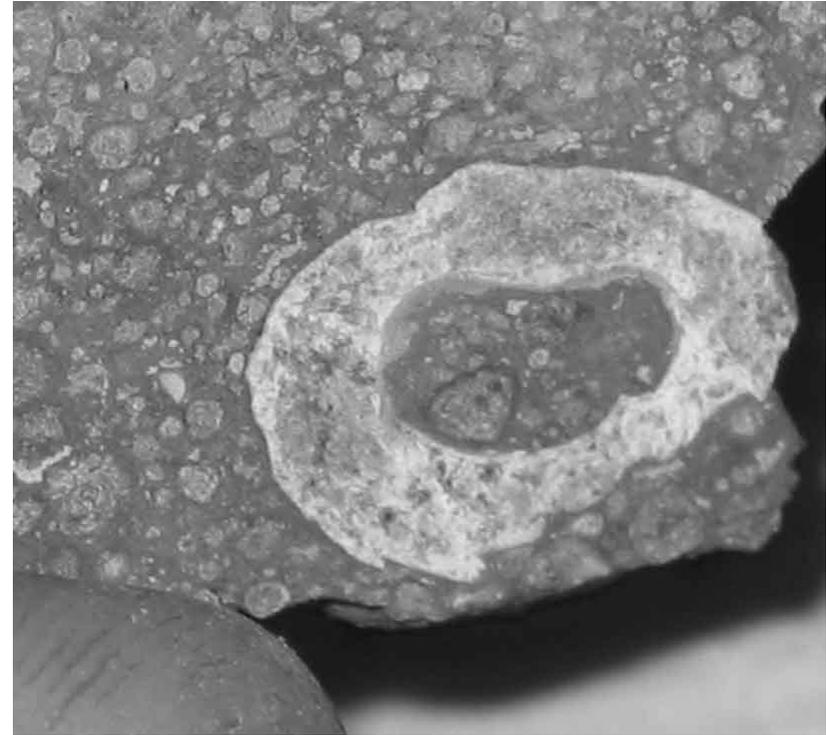
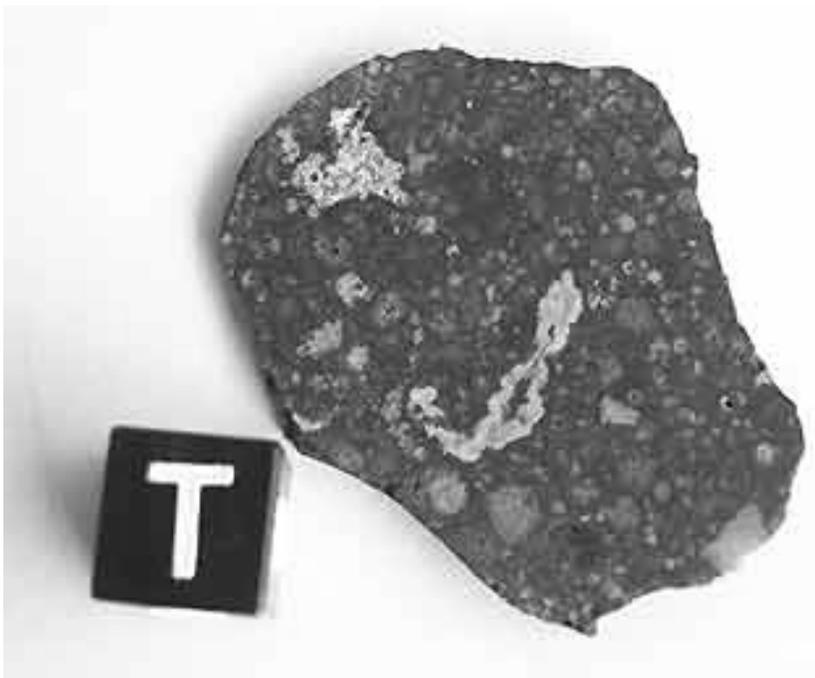
Refroidissement rapide : qq minutes  
(cristaux)

Tous les matériaux n'ont pas le  
même age dans les météorites !

Matrice

(Le « ciment », C, Si, etc..Contient des minéraux hydratés)

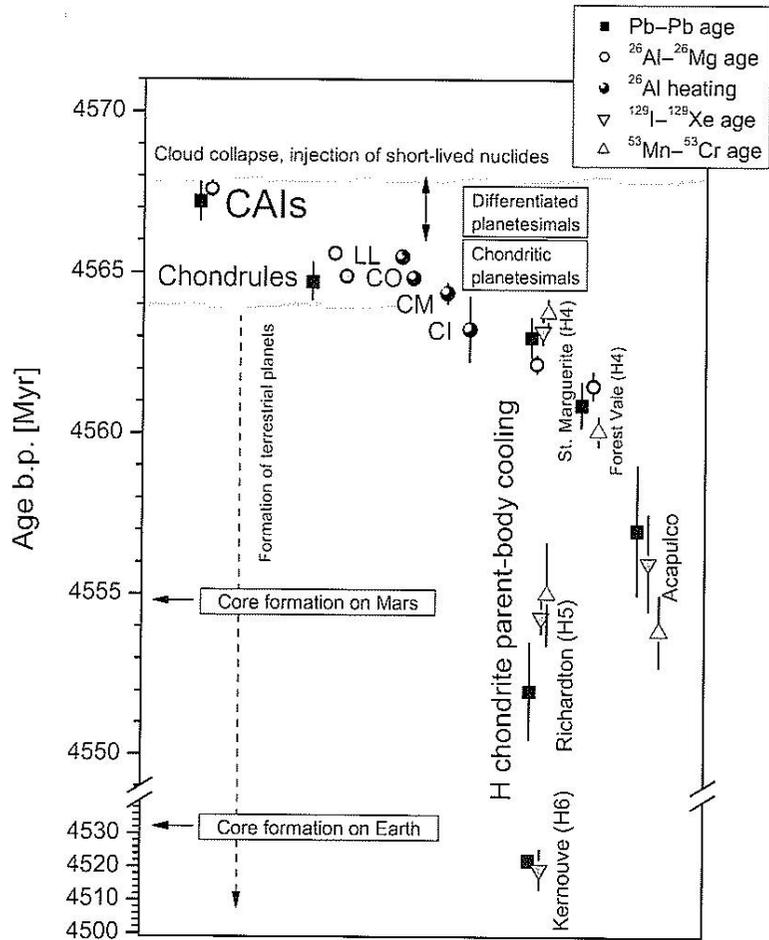
# Les CAI (Calcium Aluminium Inclusions)



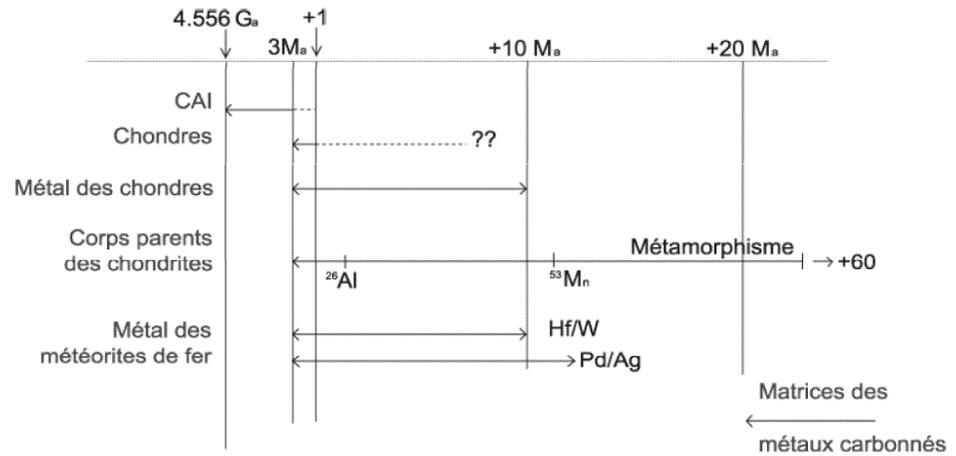
Plus vieux que les chondrules ( $+ 10^6 - 10^7$  ans  $\Rightarrow 4.566 \times 10^9$  ans )

Le matériau le plus réfractaire du Système solaire : T condensation  $\sim 2000$  K  
Refroidissement : 10 mn

# Une chronologie « absolue » des premiers événements ...



Trieloff & Palme, 2005

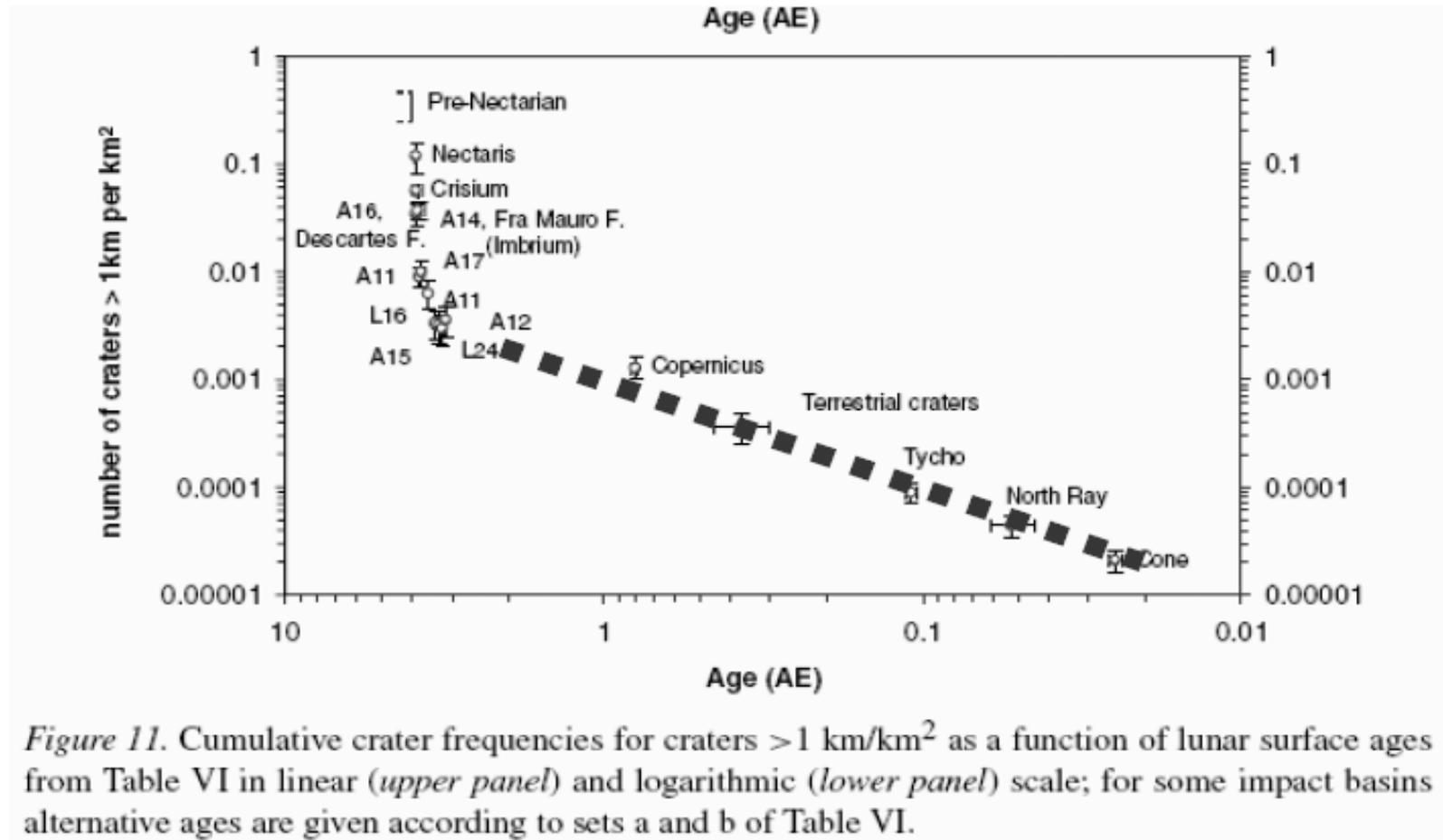


Petit et al. 2005

Age radioactif =  
Date de la dernière isolation...

# Un autre outil de datation : les cratères lunaires

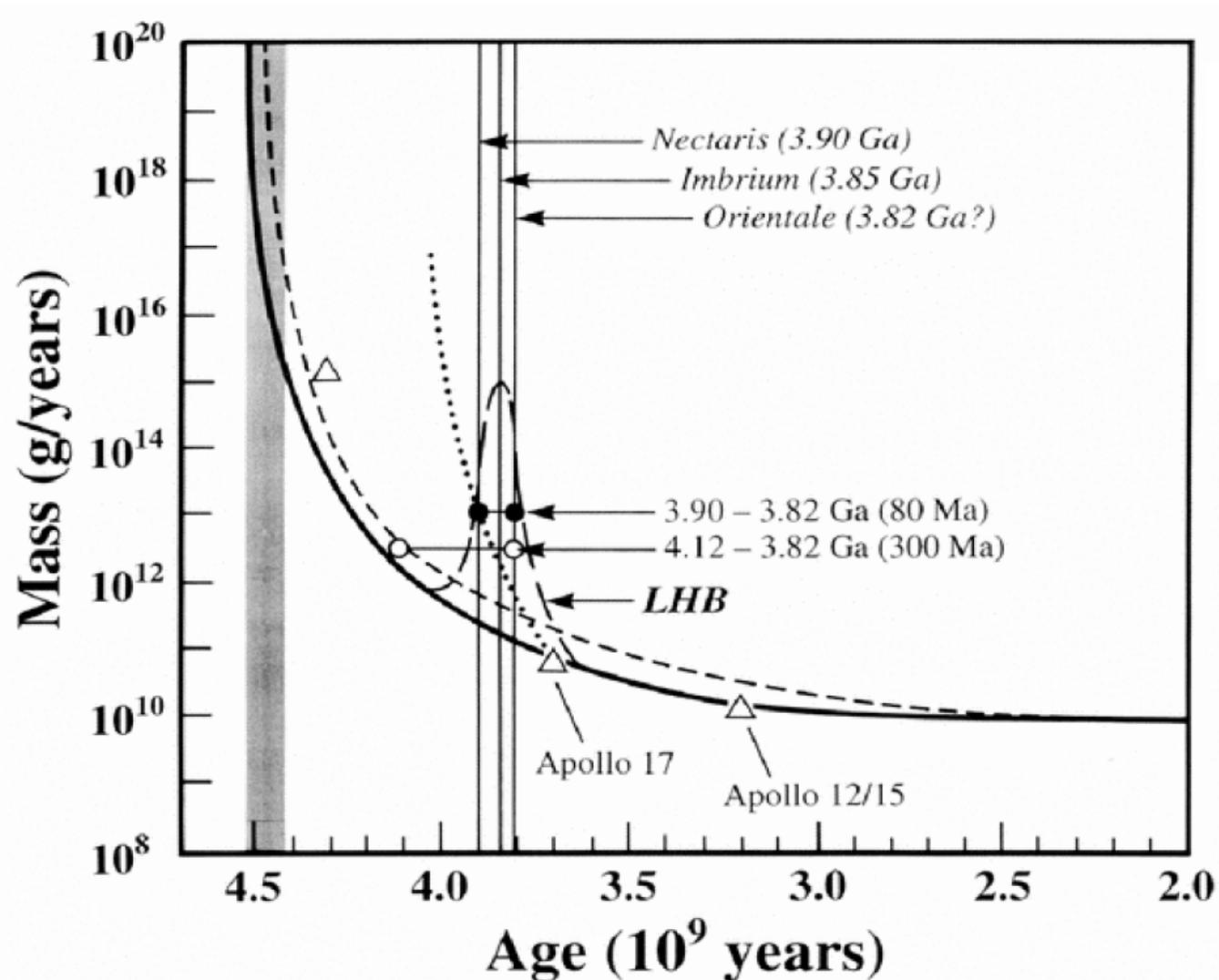
Les cratères lunaires => datés par les mission Appolo



Bombardement intense à l'origine du Système Solaire  
... et une surprise ...

Distribution différentielle ....

⇒ Mise évidence d'une phase « catastrophique » dans l'histoire lunaire :  
*Le bombardement massif tardif (LHB)*



## 2. Les premières théories modernes

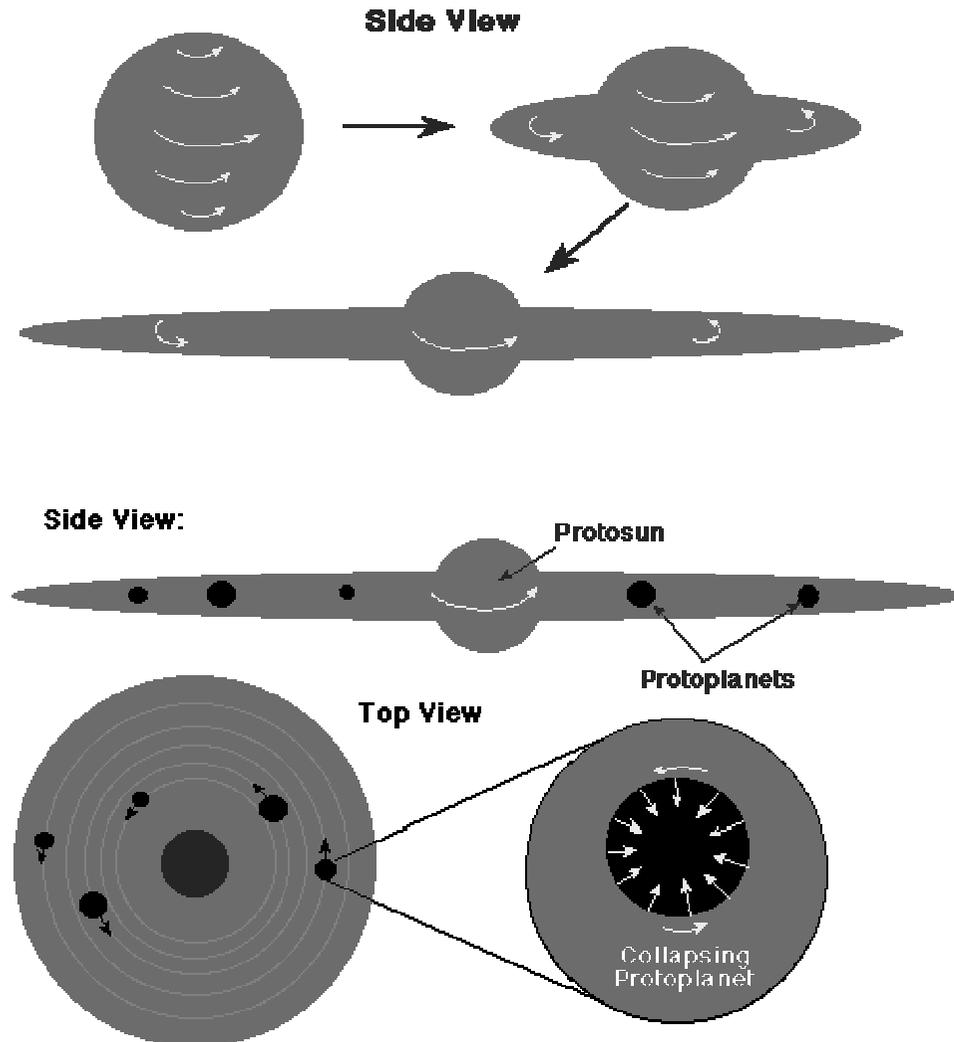
### 2 Familles de théories

- Les théories « unitaires » :  
Le soleil et les planètes  
Sont issus du même environnement
  
- Les théories « Catastrophiques »  
Le soleil a engendré les planètes  
à l'issue d'un phénomène catastrophique

Théorie unitaire :

*Nébuleuse primitive de KANT-LAPLACE :*

Effondrement d'une nébuleuse primordiale faite de gaz et de poussières.



## AVANTAGE :

Toutes les planètes se forment  
Dans le même plan  
Explique à la fois :  
Origine du Soleil et des Planètes.

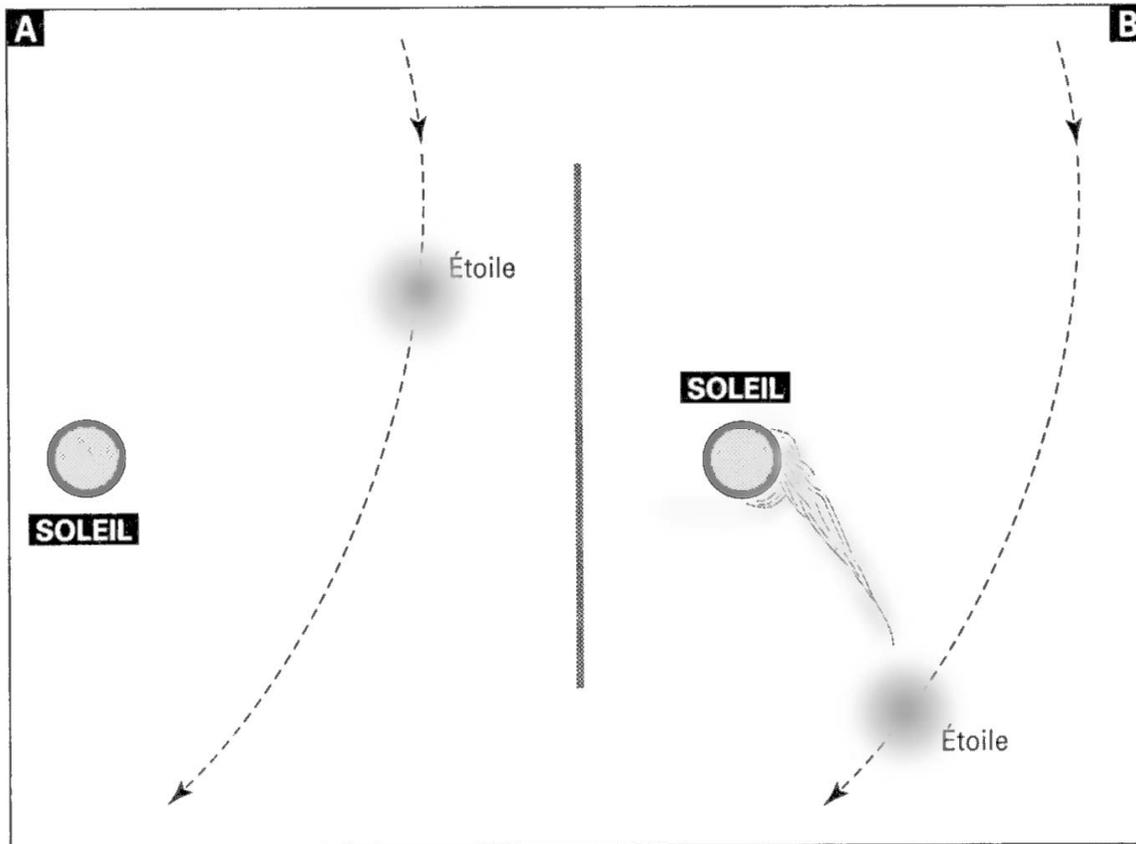
## PROBLEME :

Trop de moment cinétique dans les planètes et pas assez  
dans le Soleil

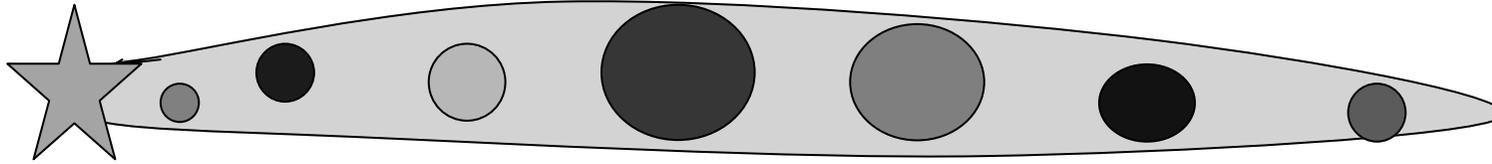
# Théories Catastrophiques

Buffon, Jeans, Jeffreys

Une étoile proche a arraché de la matière  
Au Soleil par marées



## Condensation des planètes dans le filament



### AVANTAGE :

Pas de pb. de quantité de Rotation  
(remis en question + tard)

Les planètes les + grandes sont au milieu

Les planètes sont dans le même Plan

### PROBLEME :

Événement TRES rare

Filament trop chaud : pas de condensation possible

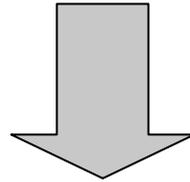
# Et alors ?

Observations & Théories récentes :

Les jeunes étoiles sont entourées  
d'un disque de gaz et de poussières

Les jeunes étoiles évacuent (10-30%)  
de leur moment cinétique par les jets bi-polaires

Une partie part également dans les vents

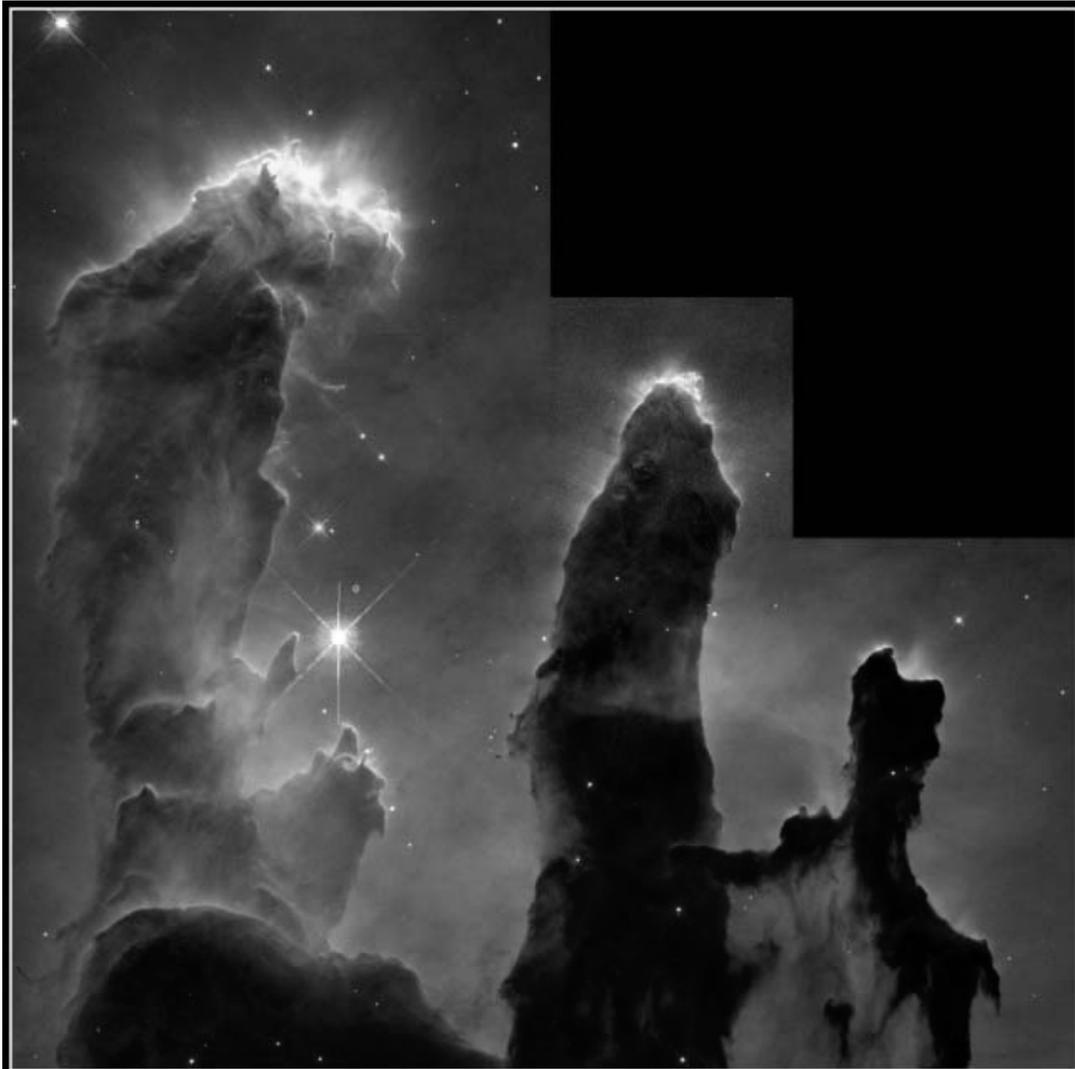


Nébuleuse de Kant – Laplace

### **3. Le Modèle Actuel**

Le point de départ :

1. Un groupe d'étoiles se forme au sein d'une nébuleuse en effondrement (spontané ou choc)
2. Les proto-étoiles s'entourent d'un cocon de gaz
3. Les étoiles subissent des rencontres proches et parfois se dispersent



**Gaseous Pillars · M16**

**HST · WFPC2**

PRC95-44a · ST Sci OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

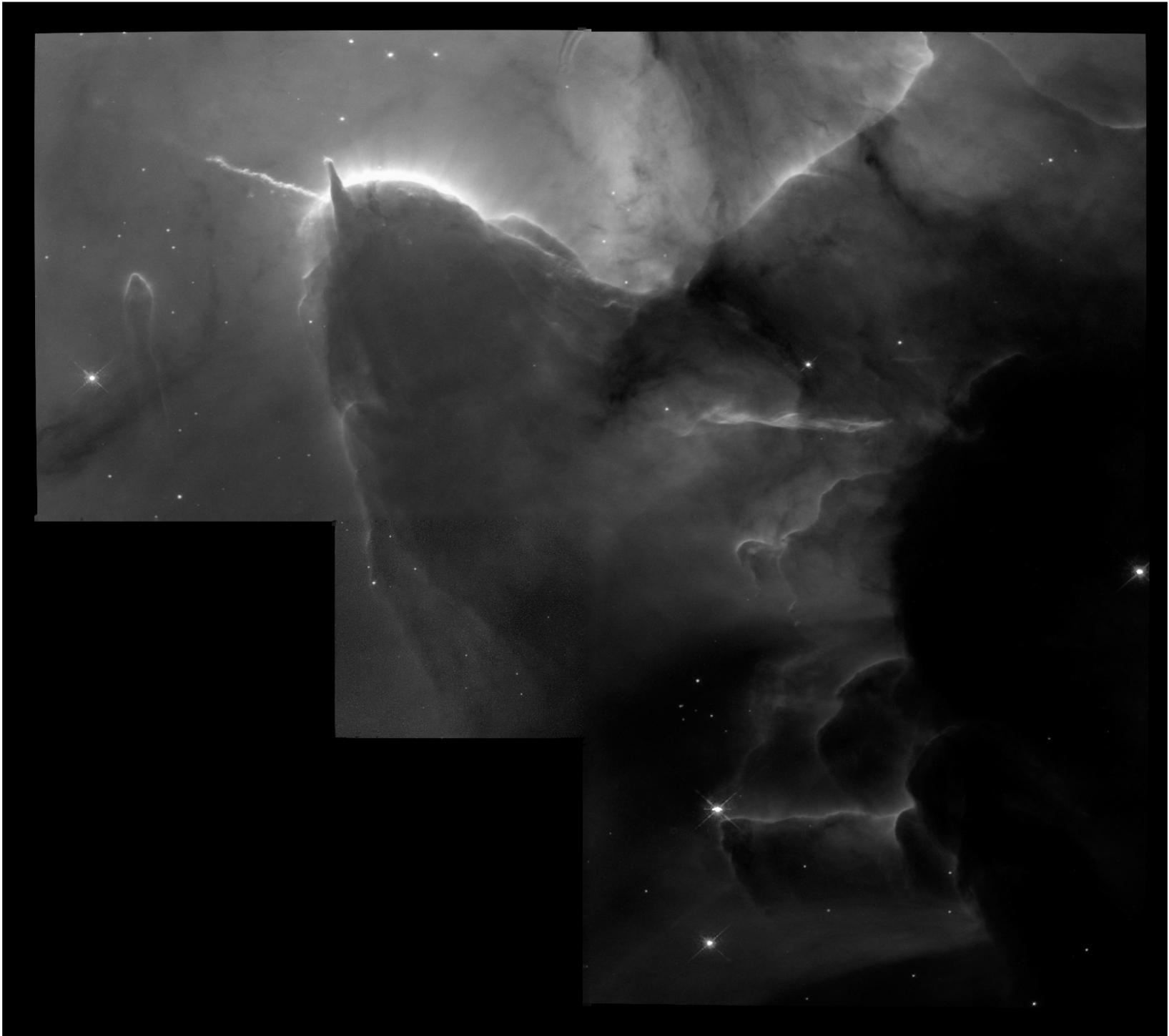
Photodissociation  
des nuages

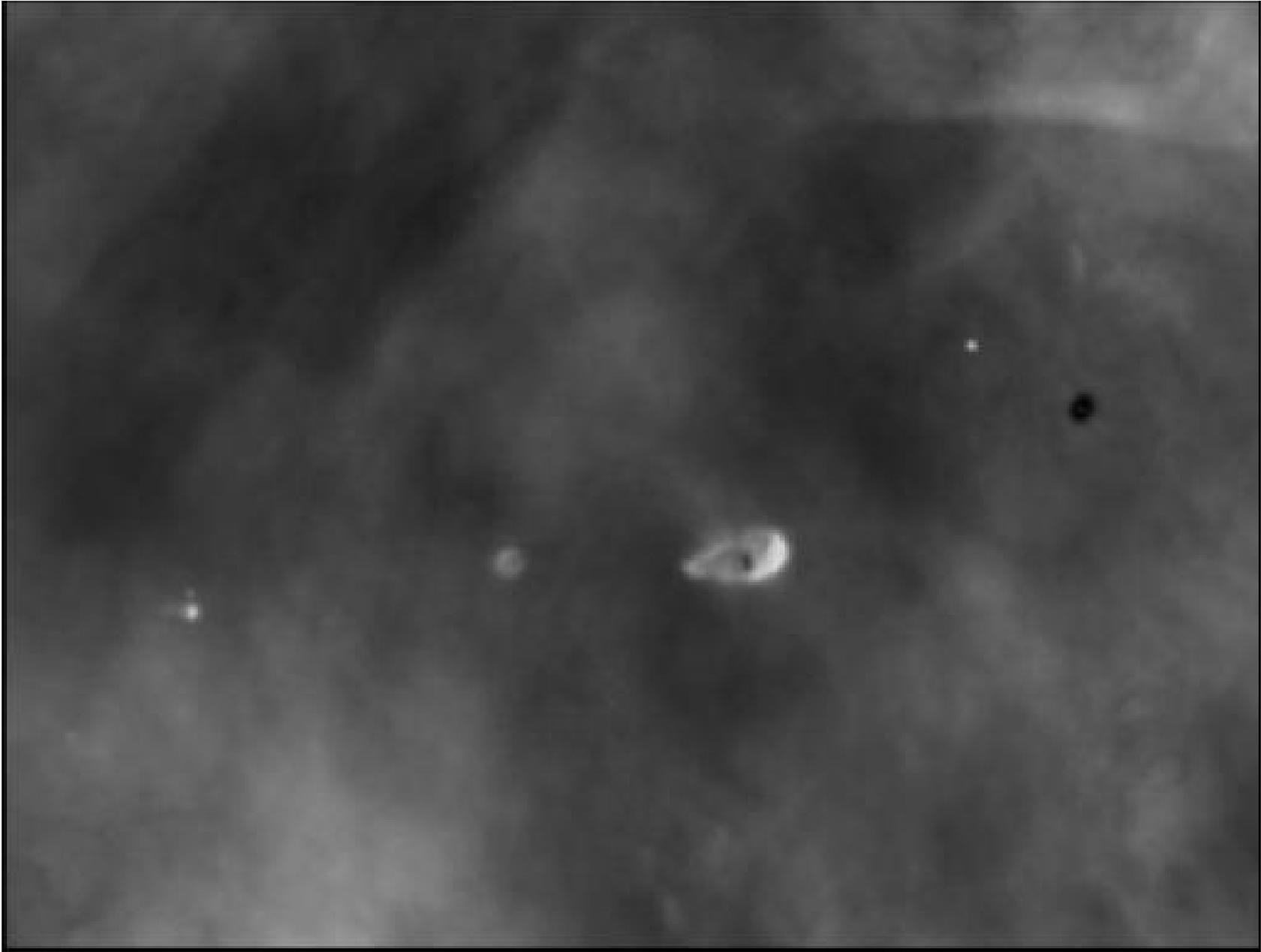


**Star-Birth Clouds · M16**

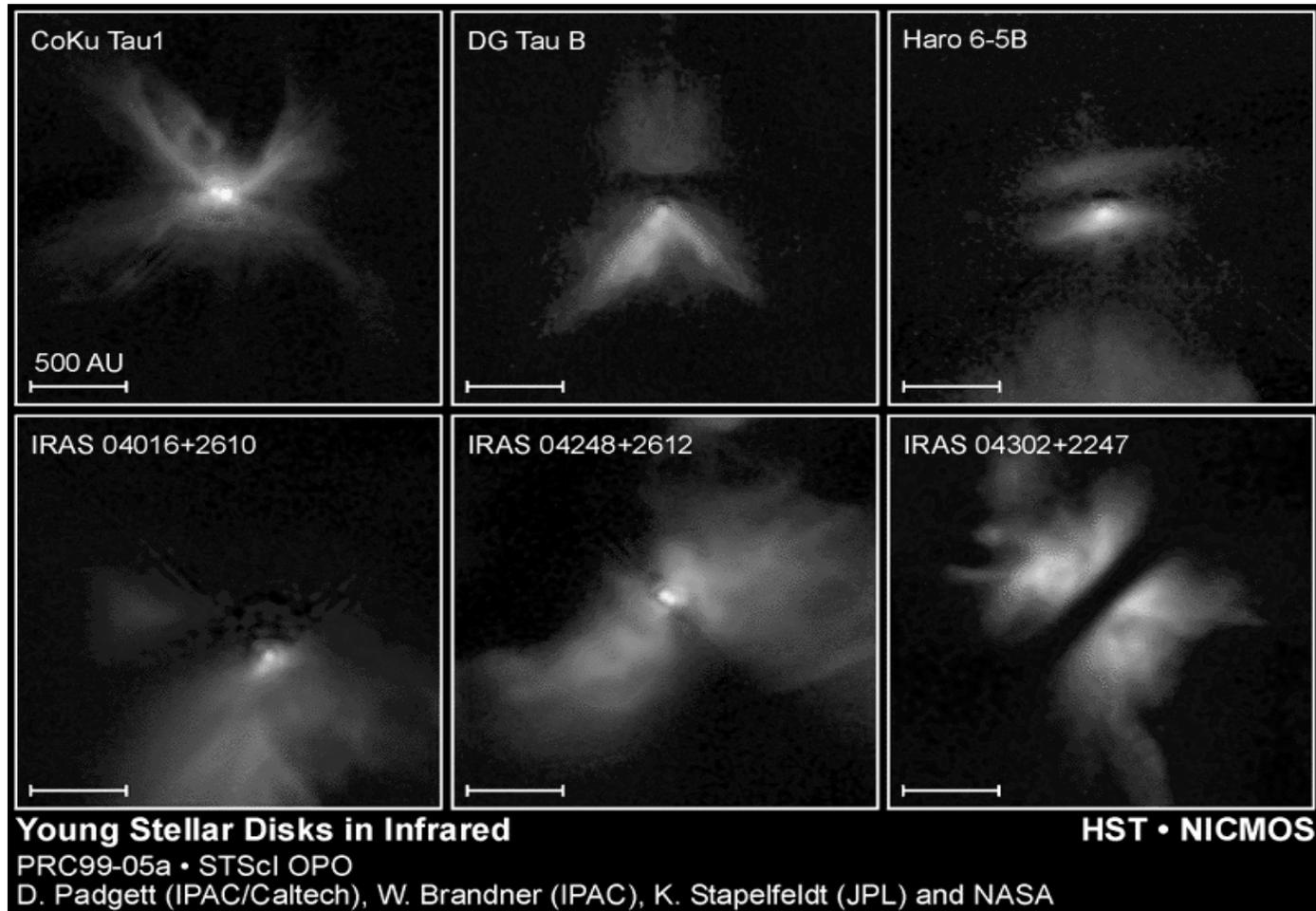
**HST · WFPC2**

PRC95-44b · ST Sci OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

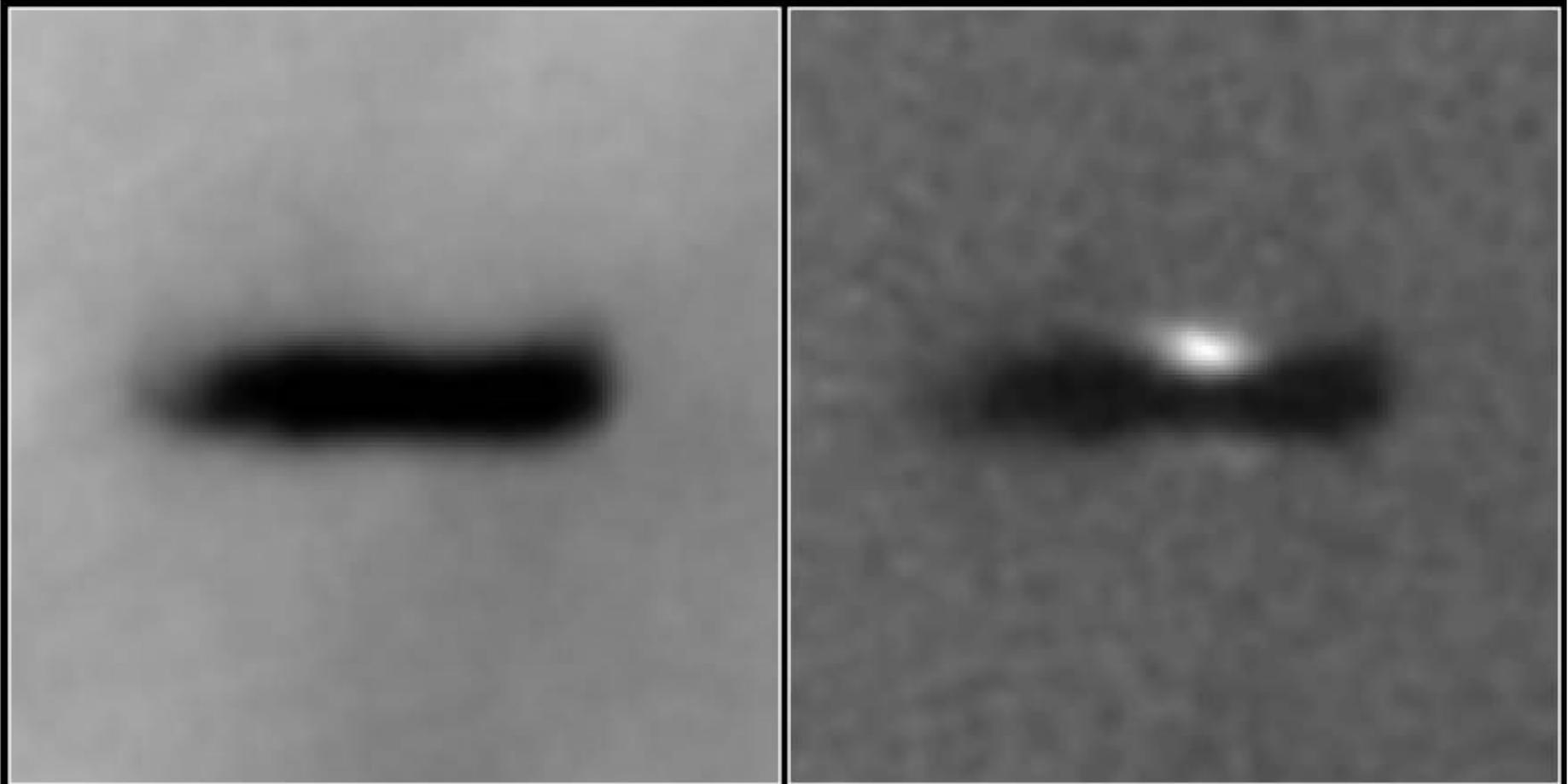




# Disques autour d'étoiles Jeunes : phase « émergée »



Pour les étoiles de type solaire, phase « émergée »



**Edge-On Protoplanetary Disk  
Orion Nebula**

HST · WFPC2

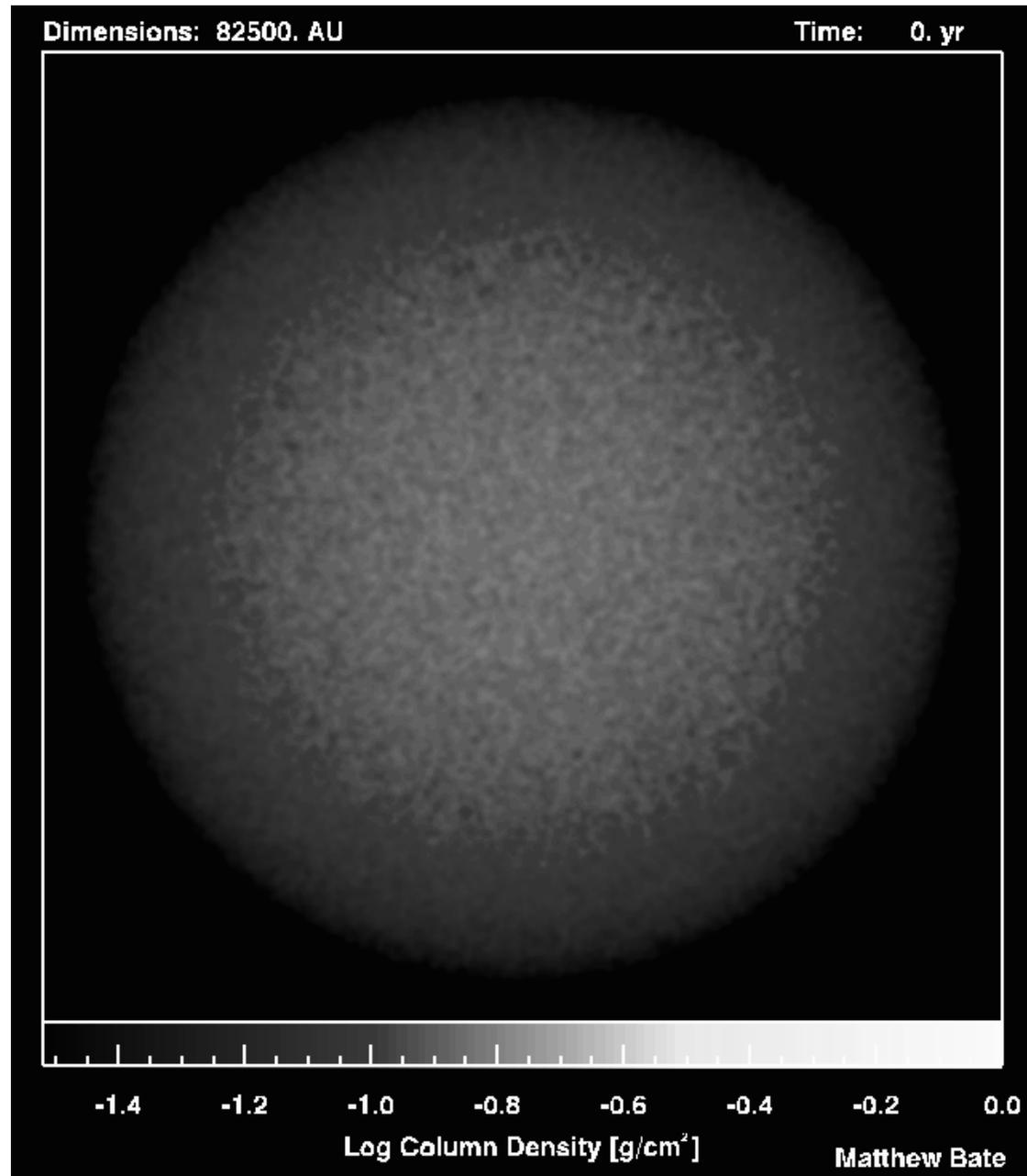
PRC95-45c · ST ScI OPO · November 20, 1995

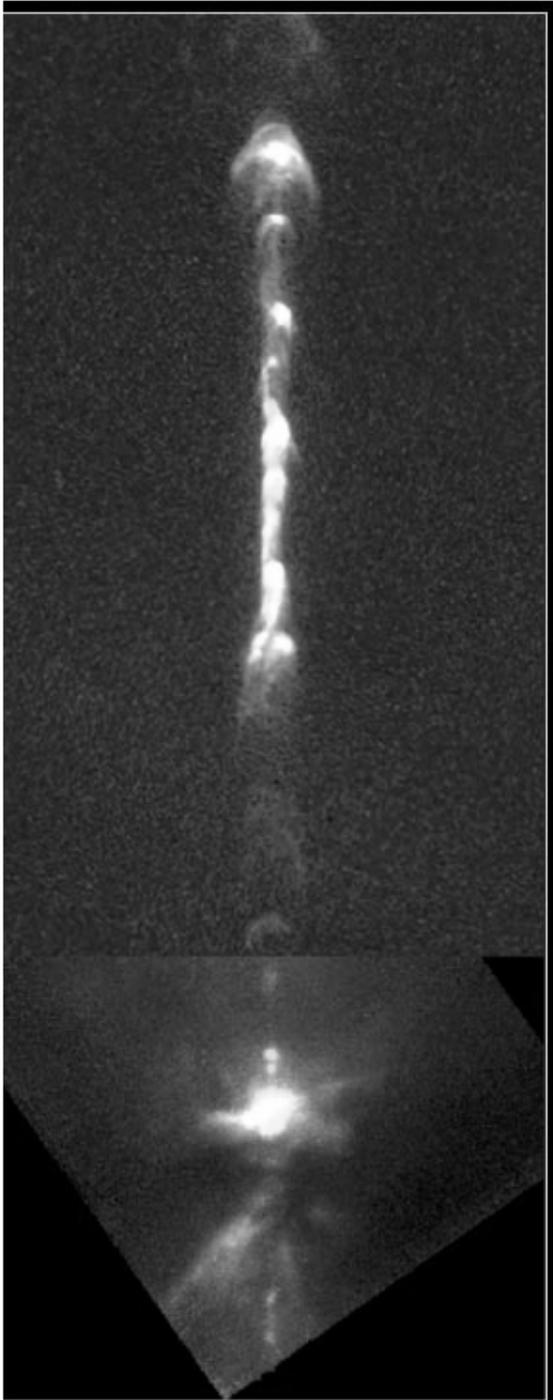
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

Simulation  
hydrodynamique 3D  
de formation d'étoiles  
en amas.

Point de départ: une  
sphère de gaz

Bate, 2002

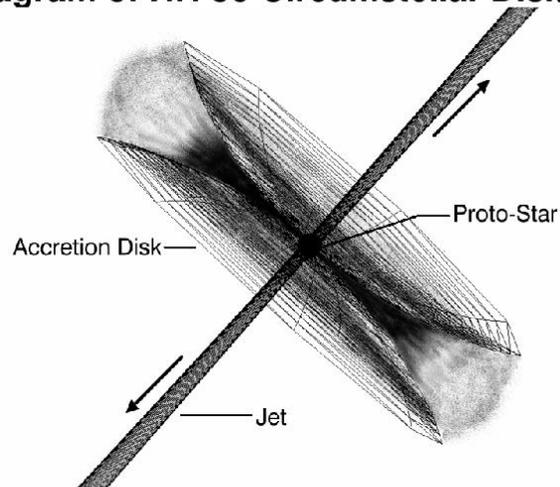




Etat Initial :

Un disque de gaz  
et de poussières  
entourant une  
étoile en  
formation

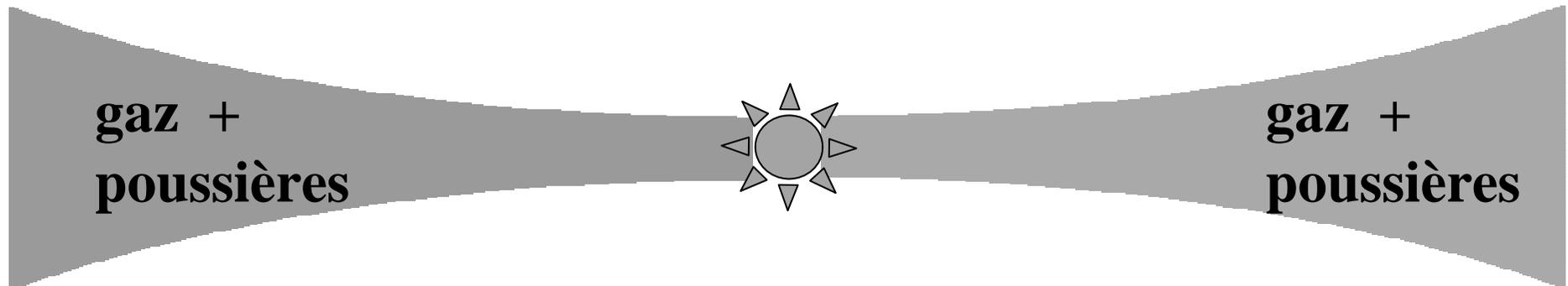
Diagram of HH 30 Circumstellar Disk & Jet



**MASSE DISQUE = 1% MASSE ETOILE**

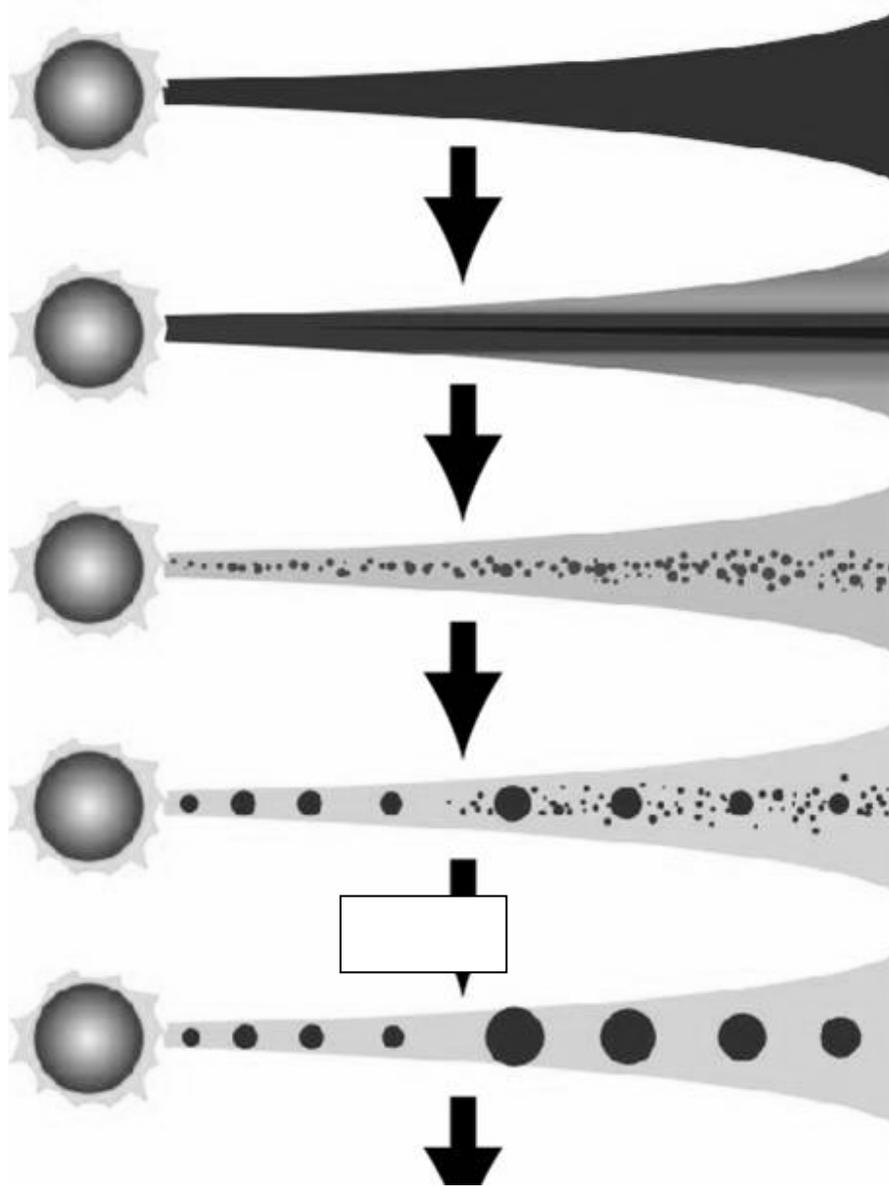
DISQUE :                    99 % en mass    GAZ ( H, He etc..)  
                                  1 %    GRAINS (Si, Fe etc..)

TAILLE DES GRAINS : ~ 1 micron

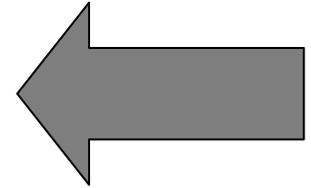


Les grains vont grandir et donneront les planètes  
d'aujourd'hui.

# Les 5 étapes de la formation planétaire



Disque de gaz + grains

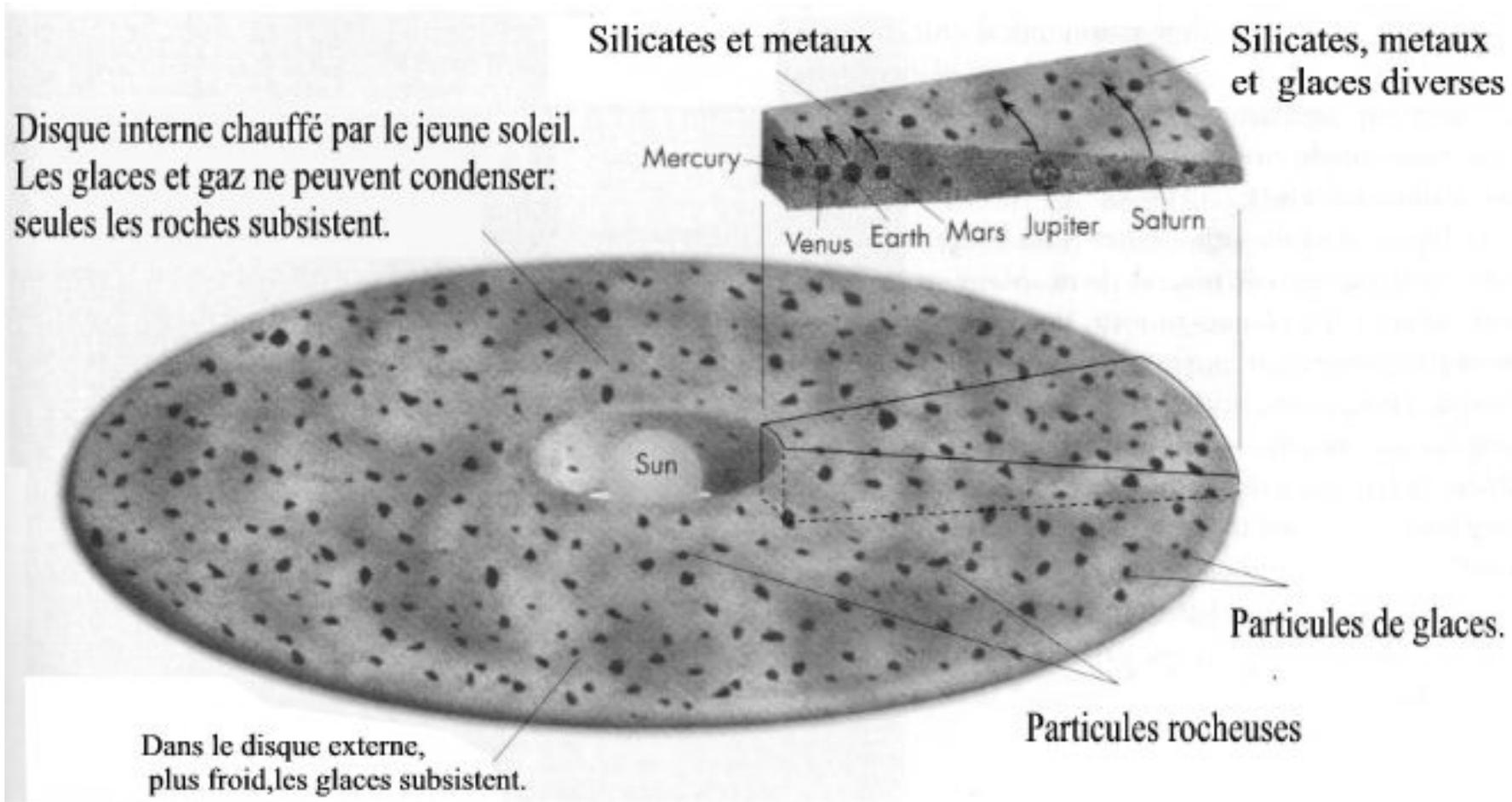


Les grains sédimentent

Planétésimaux

Embryons planétaires

Planètes



# Histoire chimique du Système Solaire

C'est l'histoire de sa température

⇒ Condensation des espèces chimiques

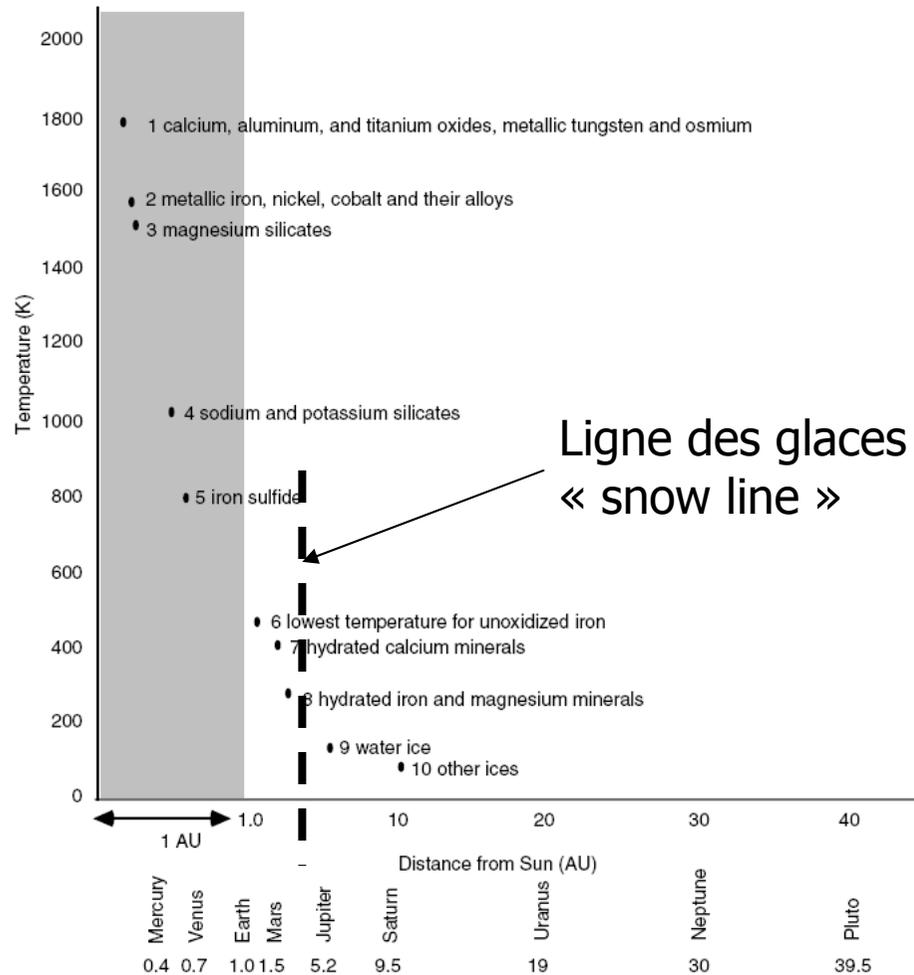
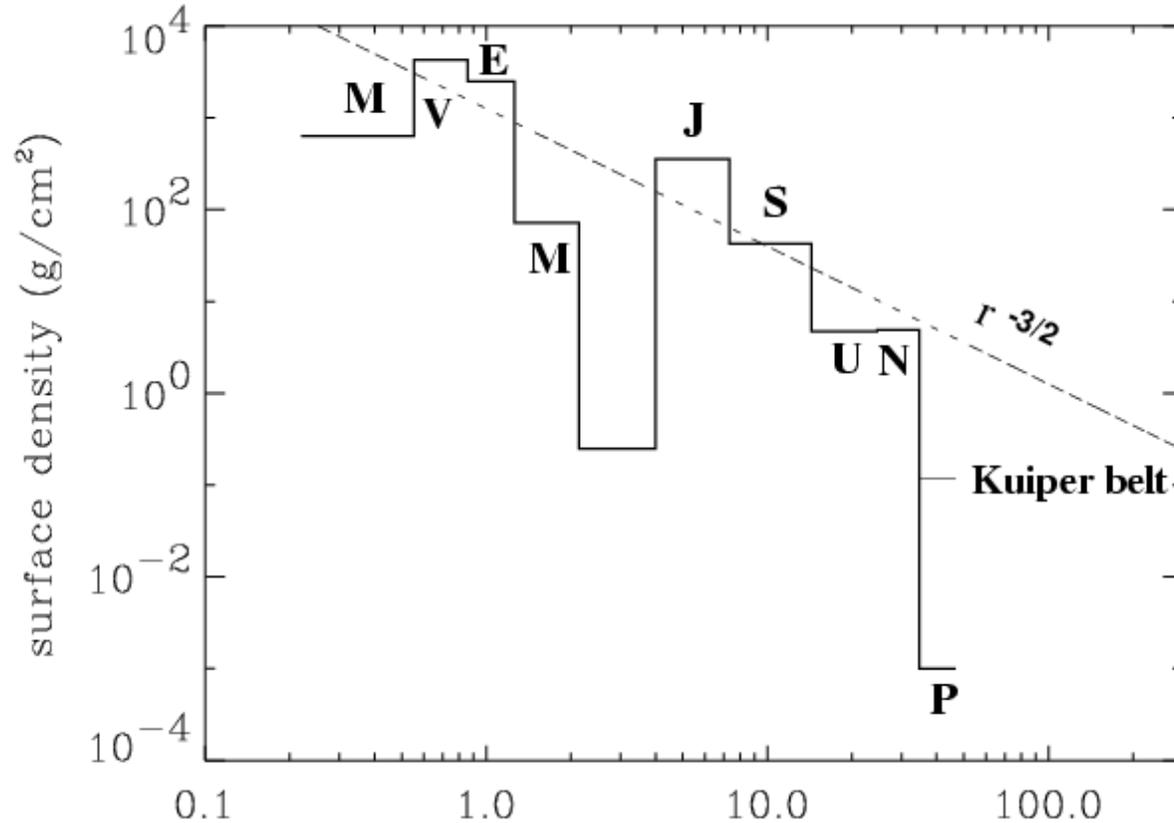


Figure 2. Temperature (K) and distance from sun (AU) at which major planetary constituents would condense from primordial solar nebula. *Note.* [Note that the shaded region on the horizontal axis represents only 1.0 AU, whereas the other axis units are 10 AUs.] The data in Figure 2 are from *The New Solar System* by J. K. Beatty & A. Chaikin, (Eds.), 1990, Cambridge, MA: Cambridge Publishing Press; *Geochemistry Pathways and Processes* by S. M. Richardson & H. Y. McSween Jr., 1989, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; and *Solar System Evolution: A New Perspective* by S. R. Taylor, 1992, Cambridge, MA: Cambridge University Press.

## Variation spatiale de la température

Le disque primordial :  
 un concept clef : « La nébuleuse de masse minimale »



(Hayashi 77)

À 1 UA :

$T \sim 700 \text{ K}$ ,  $P \sim 1 \text{ Pa}$

$\rho \sim 10^{-7} \text{ kg/m}^3$

$C_s \sim 2000 \text{ m/s}$

Densité de surface:

$$\rho_g \propto r^{-1.5}$$

Vitesse de rotation  
 du disque:

$$\Omega_k(r) = \sqrt{\frac{GM^*}{r^3}}$$

# DYNAMIQUE DU GAZ

Accélération de gravité à la distance R

$$A = GM^*/R^2 = R \Omega_k^2 \Rightarrow Az = R \Omega_k^2 \sin(i) = \Omega_k^2 H$$

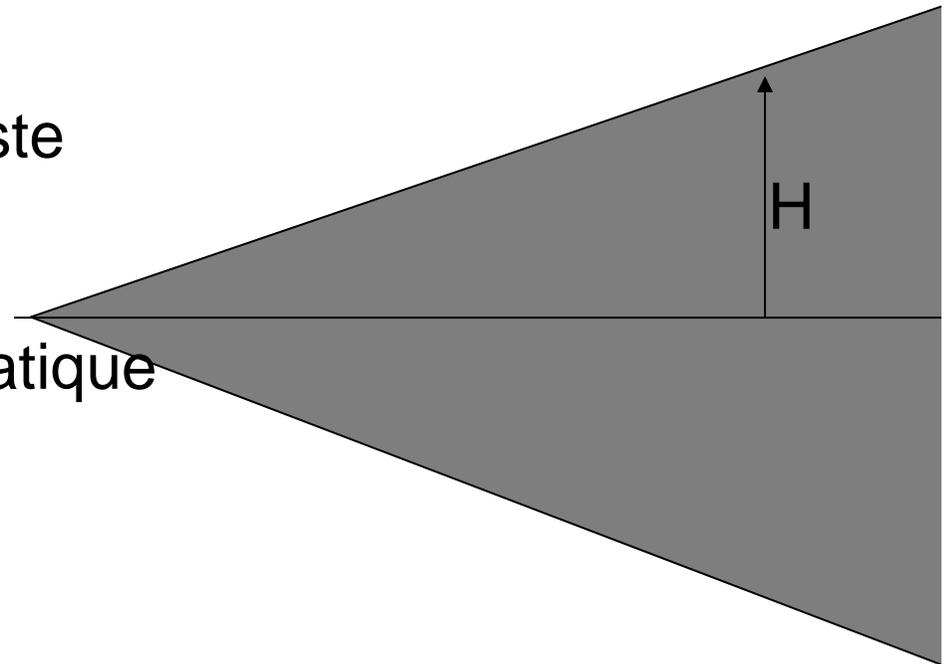
## Épaisseur du disque

Un modèle simple... mais réaliste

De disque :

Le gaz est en équilibre hydrostatique

Pression  $\Leftrightarrow$  Gravité



À 1 AU :  $H \sim 10^{10} \text{ m} \sim 0.1 R \Rightarrow H \ll R$  dans le disque

Comme la gravité diminue plus vite que la température=> le disque est évasé !!

Vitesse du son

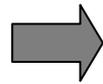
$$c = \sqrt{\frac{k_B T}{\mu m_u}} \propto T^{1/2} \quad \text{Or si } T \propto r^{-q} \quad \text{Donc } c \propto r^{-q/2}$$

$$H \equiv \sqrt{2} c \Omega_K^{-1}$$

$$c \propto r^{-q/2}$$

$$\Omega_k \propto r^{-3/2}$$

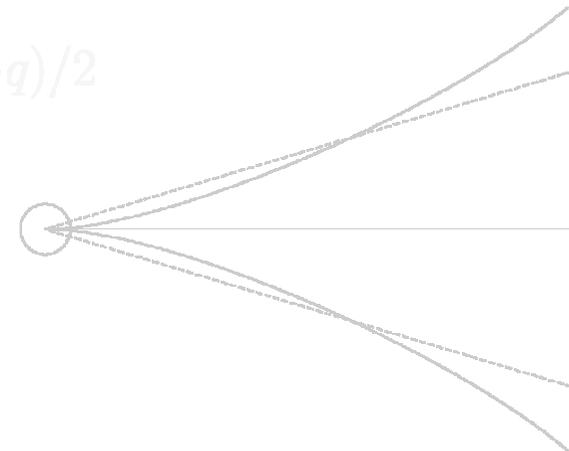
Profile képlérien



$$\frac{H}{r} = \sqrt{2} \frac{c}{r \Omega_K} \propto r^{(1-q)/2}$$

Cas classique :  $q=1/2$

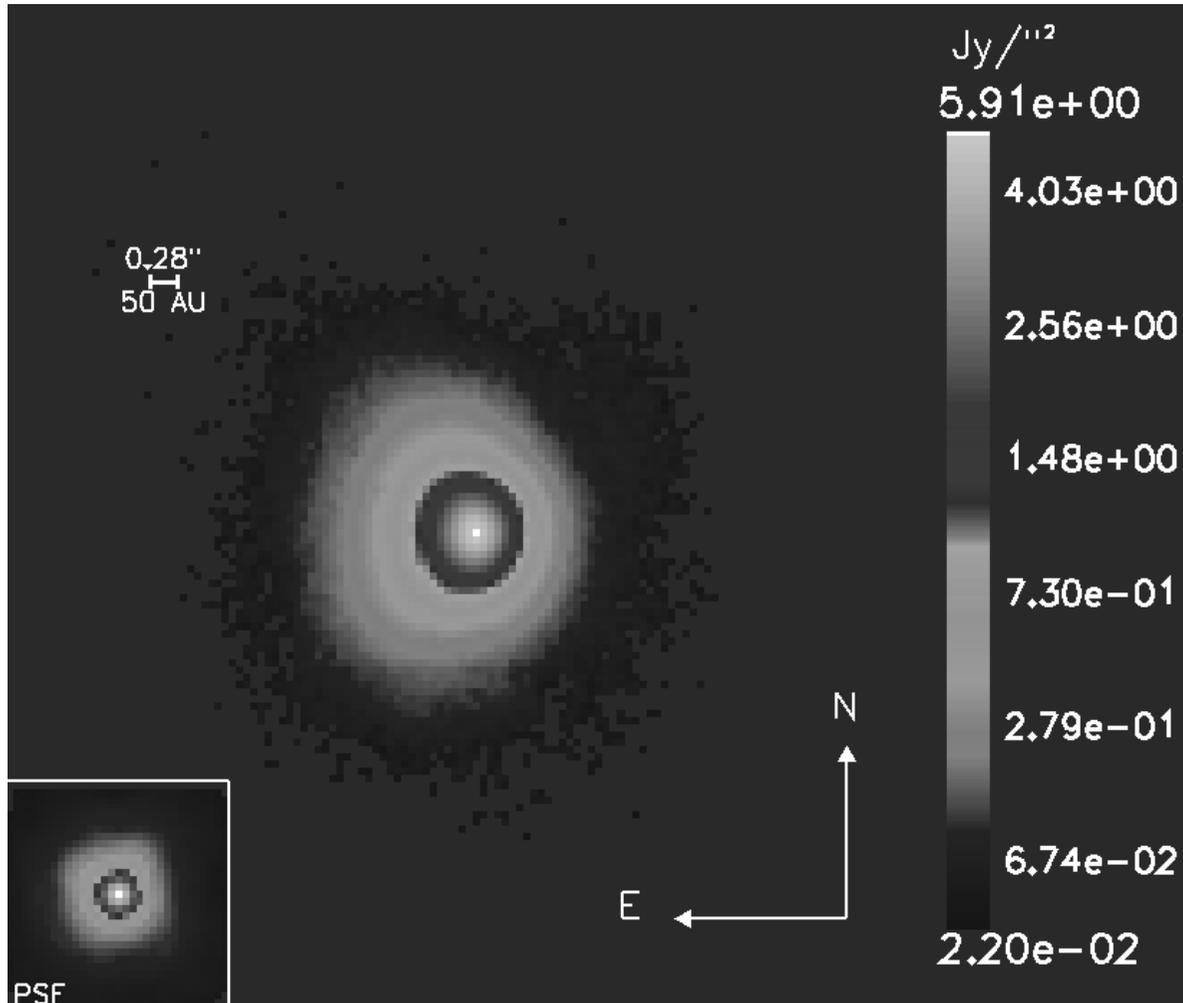
$$H/r \propto r^{1/4}$$



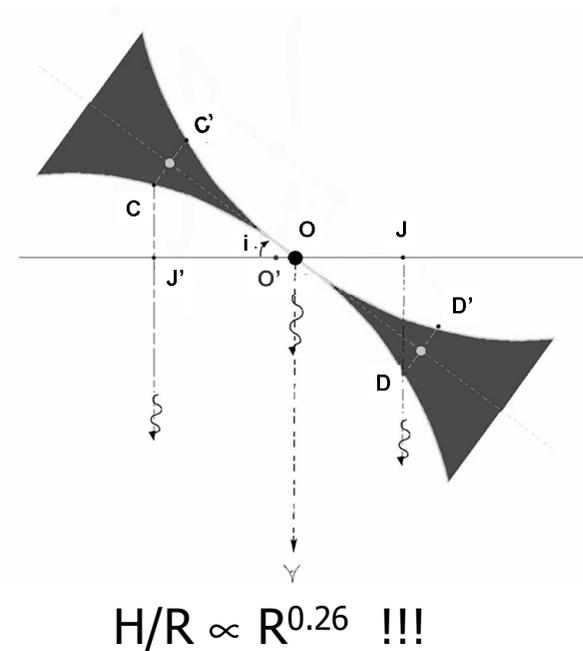
**LE DISQUE EST EVASE !!!!**

# Une observation VISIR récente ...

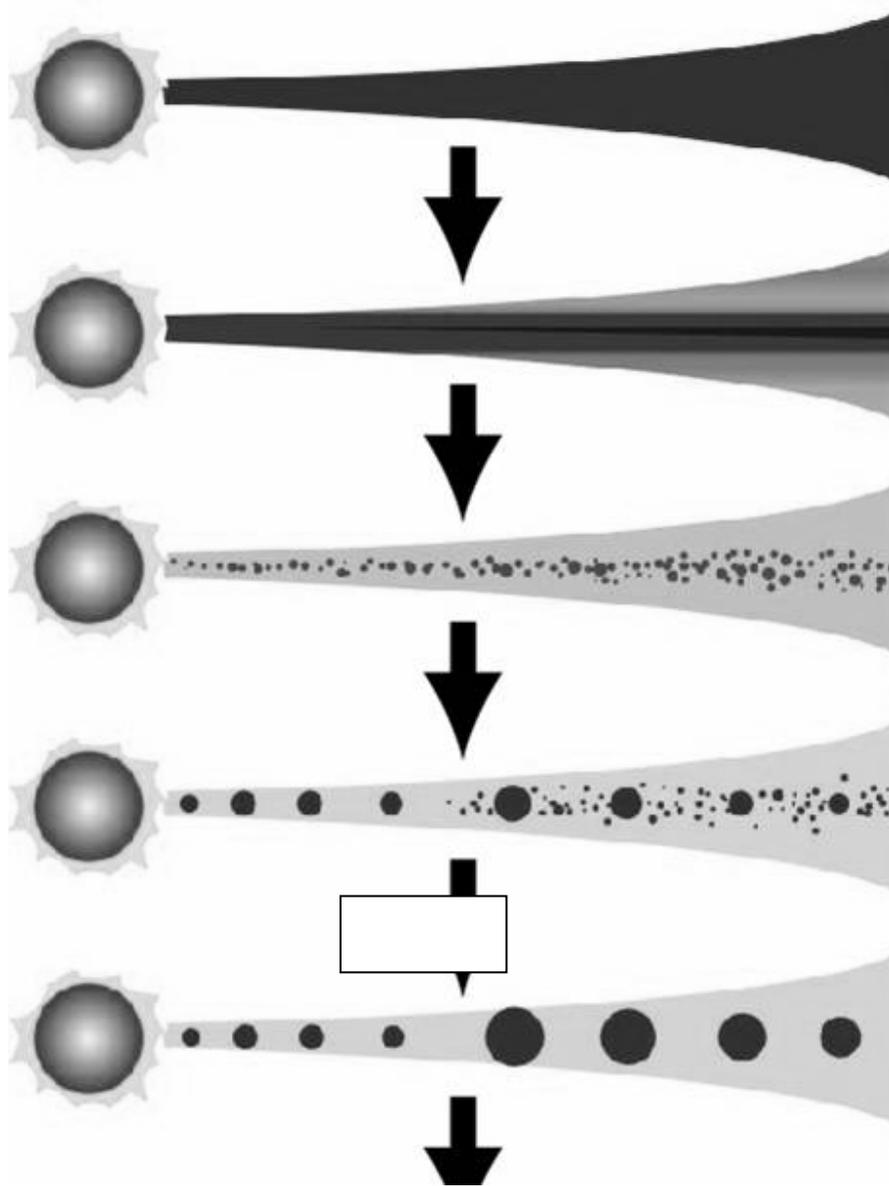
Lagage, Doucet, Pantin, Habart, Duchêne, Pinte, Charnoz, Pel  
Science, Dec. 2006



Interprétation géométrique



# Les 5 étapes de la formation planétaire



Disque de gaz + grains

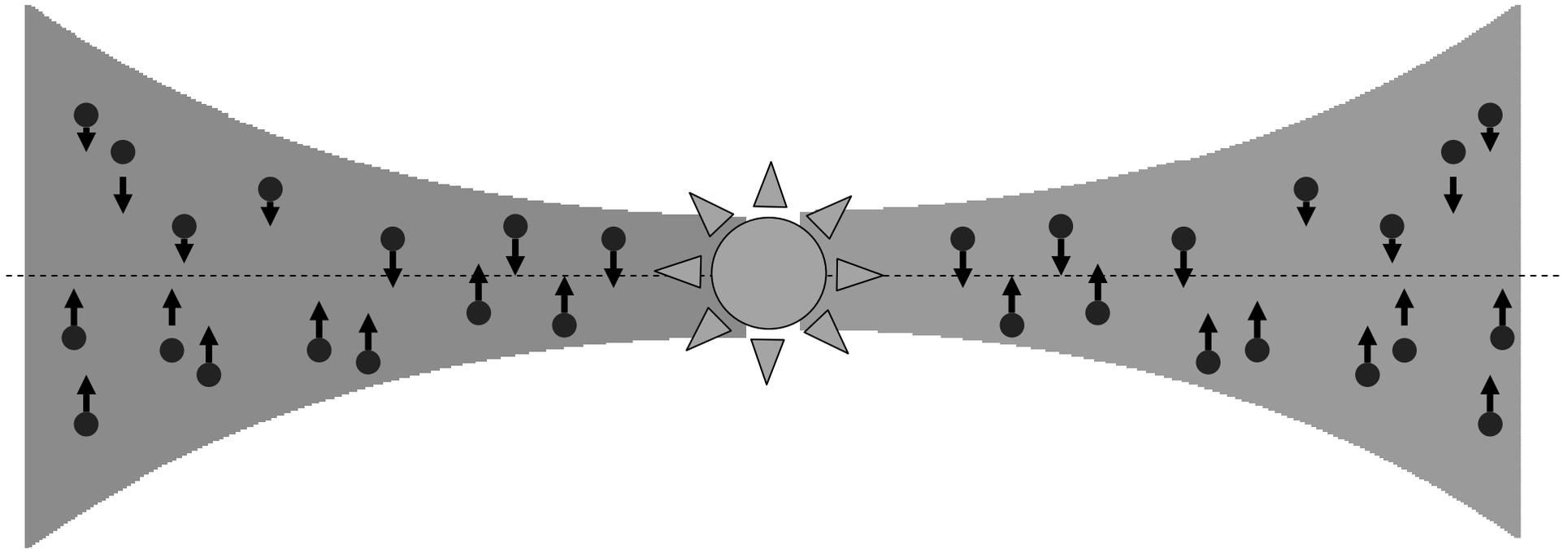
Les grains sédimentent

Planétésimaux

Embryons planétaires

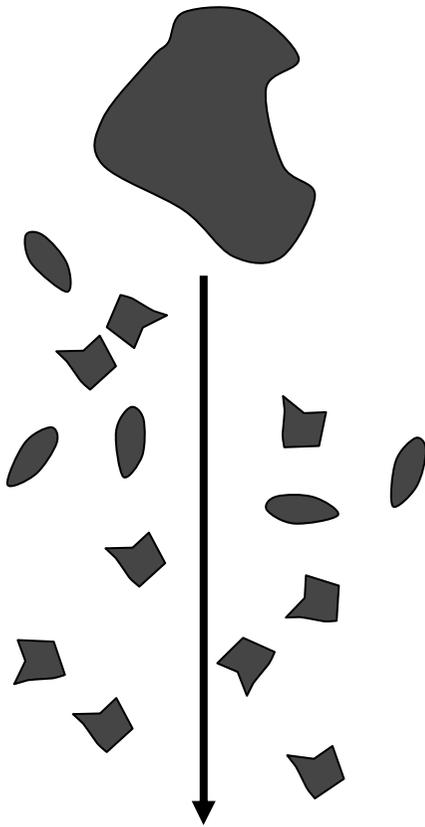
Planètes

2<sup>ème</sup> étape :  
Les grains sédimentent dans le plan médian  
du disque

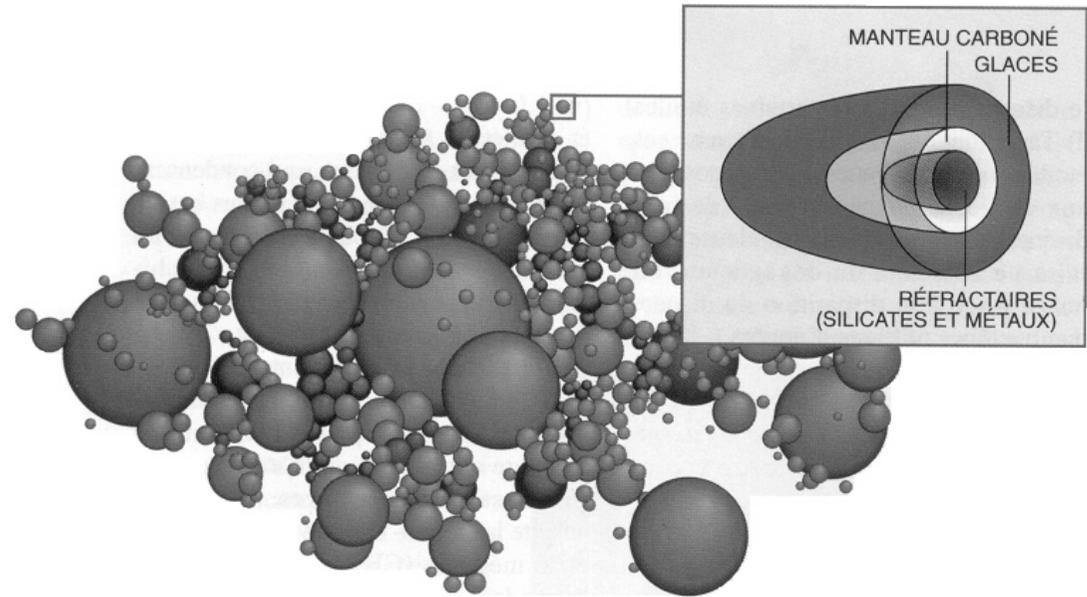


# Pendant la chute:

## Les plus gros flocons rattrapent les plus petits et les absorbent



### Collages de surfaces : agrégats fractals



## FORCE DE FROTTEMENT SUR LES GRAINS

Les grains frottent contrent le gaz et chutent dans le plan équatorial

Ils sont soumis à la **force de frottement d'Epstein**  
(taille des grains  $\ll$  libre parcours moyen des molécules)

$$\vec{F}_f = -\pi r^2 \rho C_s (\vec{V} - \vec{V}_{gaz}) \quad \text{avec } \vec{V}_{gaz} = r \Omega_g \vec{e}_\phi$$

On peut définir un temps de mise à l'équilibre des grains :

$$PFD \Rightarrow \frac{dv}{dt} + \underbrace{\frac{\pi r^2 \rho C_s}{m}}_{1/\tau_e} v = \frac{\pi r^2 \rho C_s V_{gaz}}{m}$$

$$\tau_e = \frac{m}{\pi r^2 \rho C_s} \propto r$$

$$v_{equilibre} = V_{gaz}$$

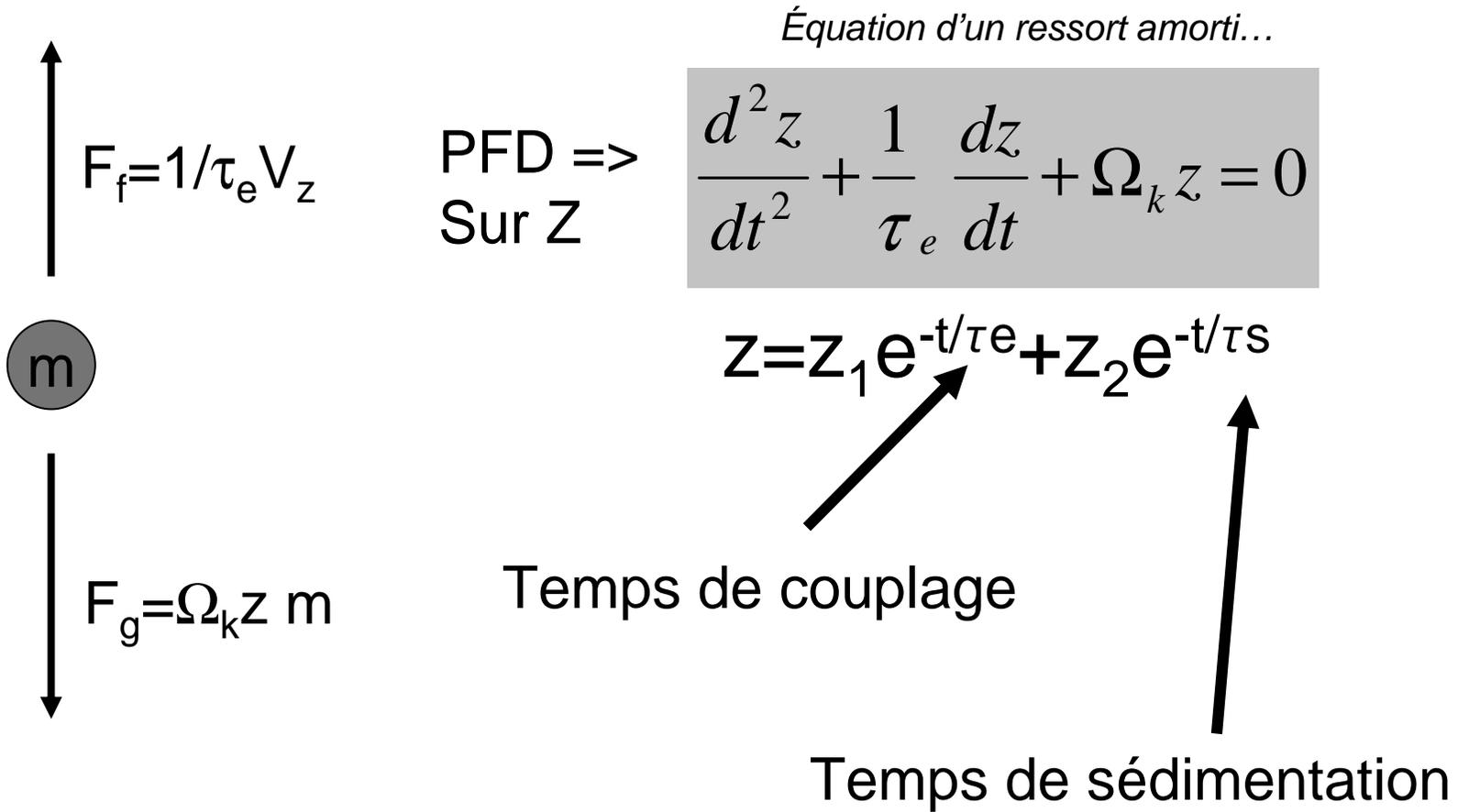
Pour une particule avec  $r=10^{-6}$  m faite de roche on obtient  $\tau_e \sim 10$  s !! Et si  $R=30$  cm on a  $\tau_e \sim 50$  ans ( $\rho$ =densité du gaz)

$\tau_e$

Les grains sont donc *très rapidement* couplés au gaz .



# SEDIMENTATION DES GRAINS



$$\tau_s = \frac{\rho_g C_s}{\Omega_k^2 \rho_s r_p} = 10^5 \text{ ans à 1 UA}$$

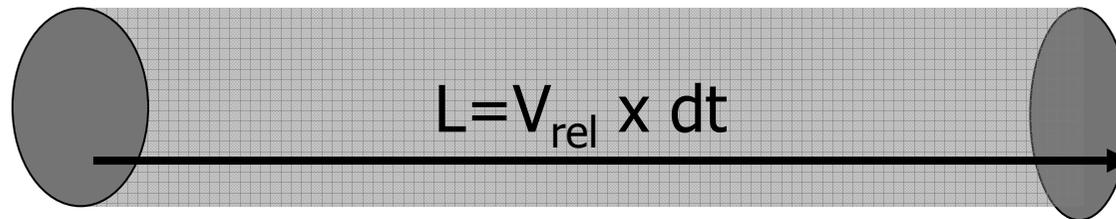
## CROISSANCE DES GRAINS

Mais en fait ce temps est beaucoup plus court car pendant leur chute les grains grandissent (  $r_p$  augmente)

En effet, les collisions entre grains font grandir la taille des grains .... **A quelle vitesse ??**

Masse accumulée en un temps  $dt$

$$dm = \rho \pi r_p^2 V_{rel} dt$$



$$\frac{dm}{dt} = \rho \pi r_p^2 V_{rel}$$

Densité de  
solide =  $\alpha \rho_{\text{gaz}}$

Section efficace

$V_{rel} \sim$  Vitesse  
d'agitation moléculaire

$$V_{rel} \sim C_s / (m/m_{h2})^{1/2}$$

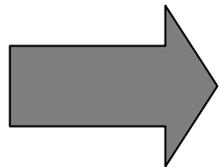
## CROISSANCE DES GRAINS

d'où :

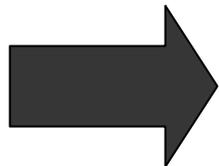
$$\frac{dr}{dt} = \alpha \frac{\rho_g C_s}{\rho_s \sqrt{A}}$$

Avec  $A \sim$  masse molaire/masse hydrogène

On trouve  $dr/dt \sim 0.1$  à  $1$  cm par an !!

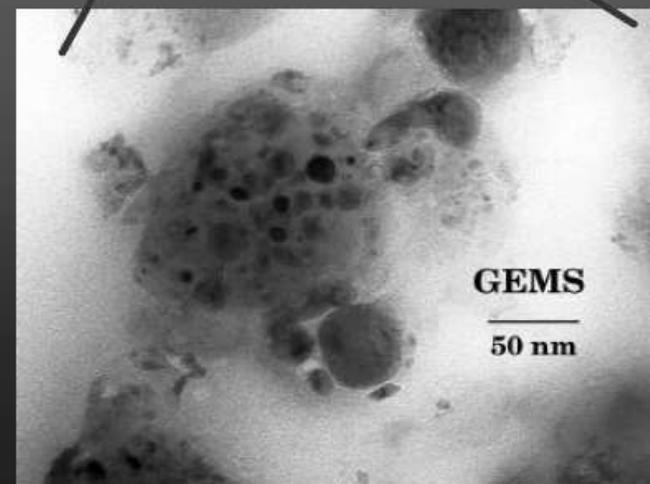
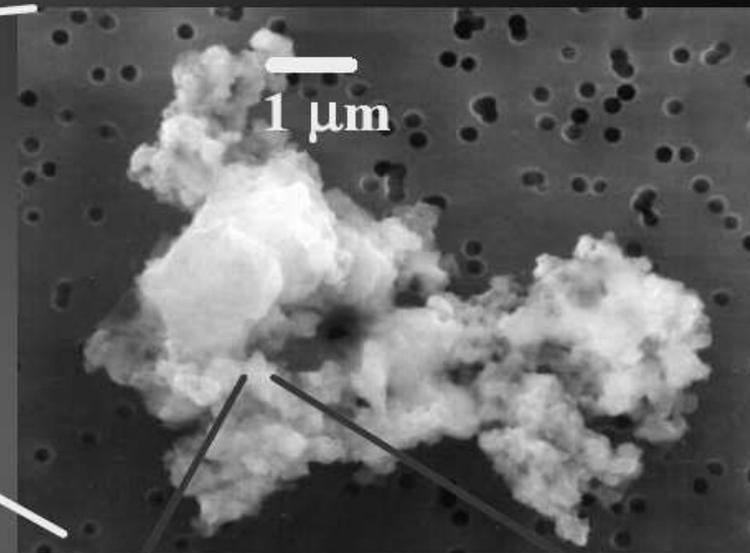


Le temps de sédimentation est réduit

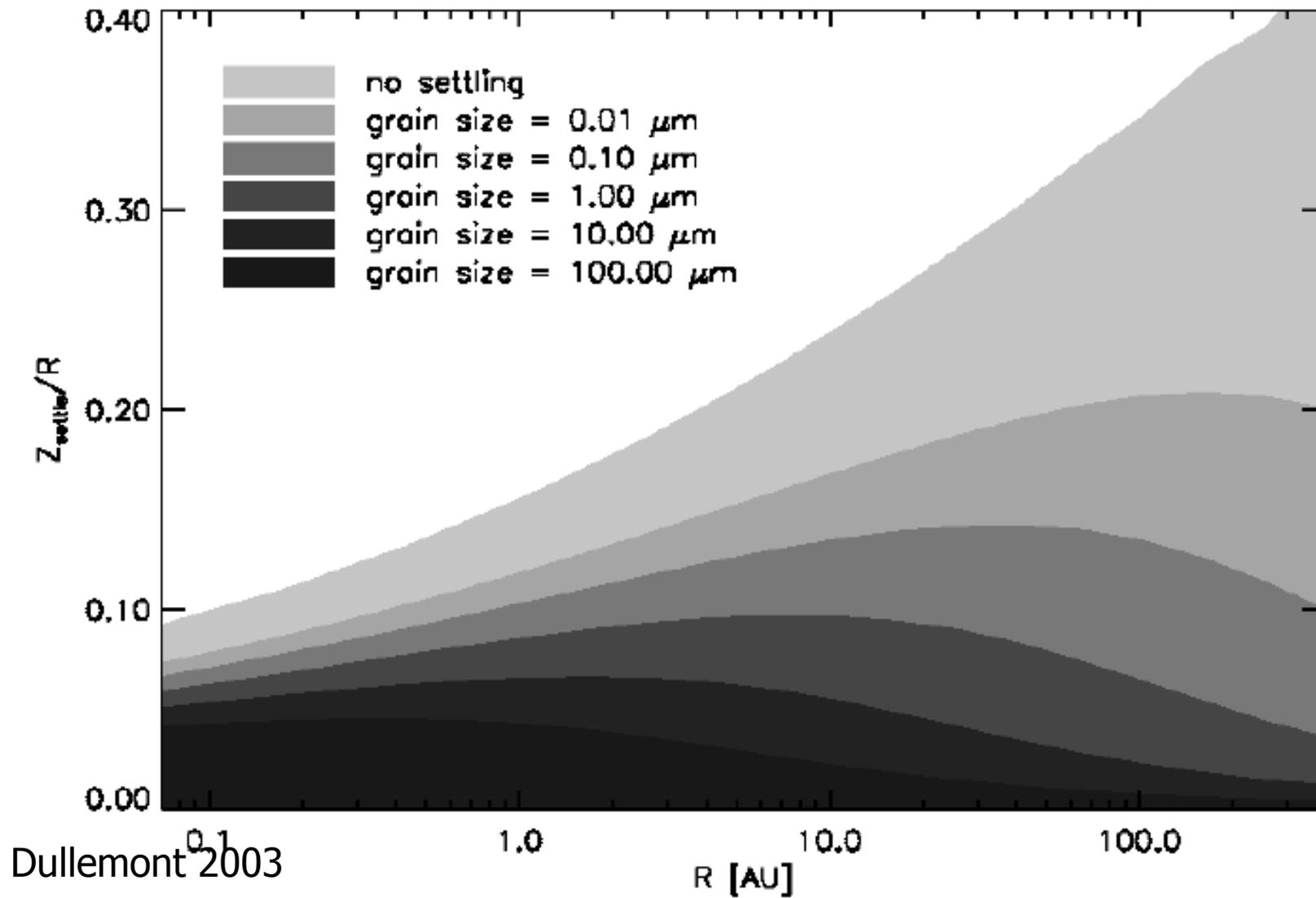


On atteint des tailles de l'ordre du cm au m

Interplanetary dust particles – collected in the stratosphere  
→ some of cometary origin



En réalité : nébuleuse turbulente  $\Leftrightarrow$  équilibre avec le mixage vertical  
(Weidenshilling 97, Dobrolovski 93)

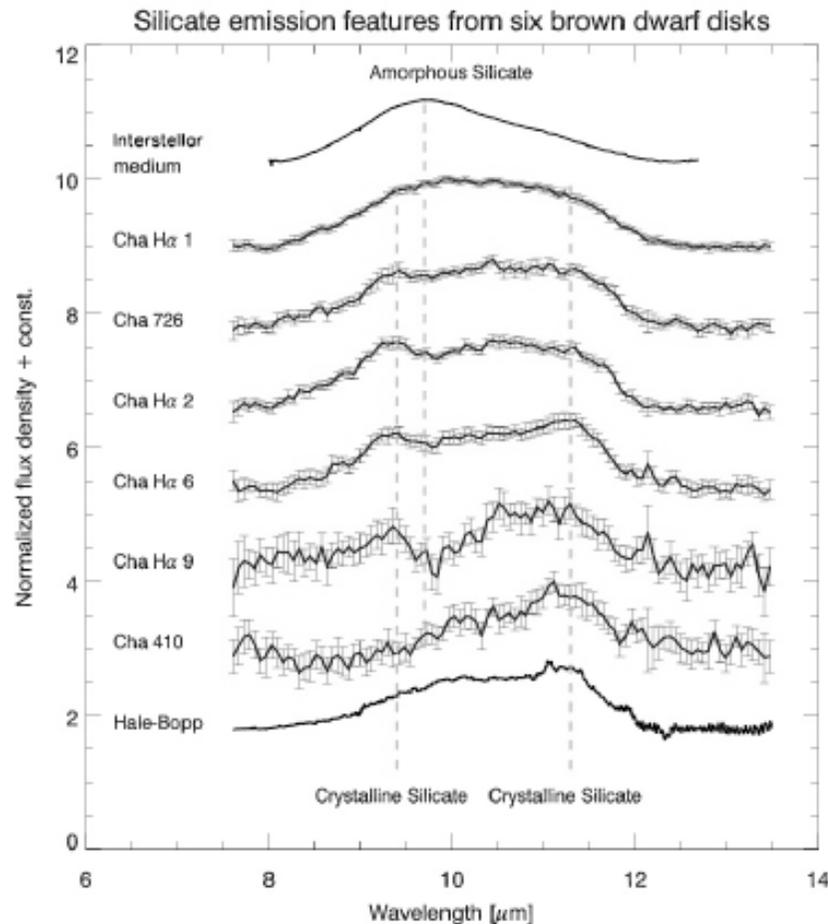


Grains les plus gros sédimentent les plus vite !!

# Confirmation observationnelle de la croissance des grains

Quand les grains s'accumulent ils ont tendance à cristalliser

Apai et al., 2005



Plus les grains sont gros  
plus ils semblent cristallisés

=> On interprète cela comme  
un Effet de la sédimentation.

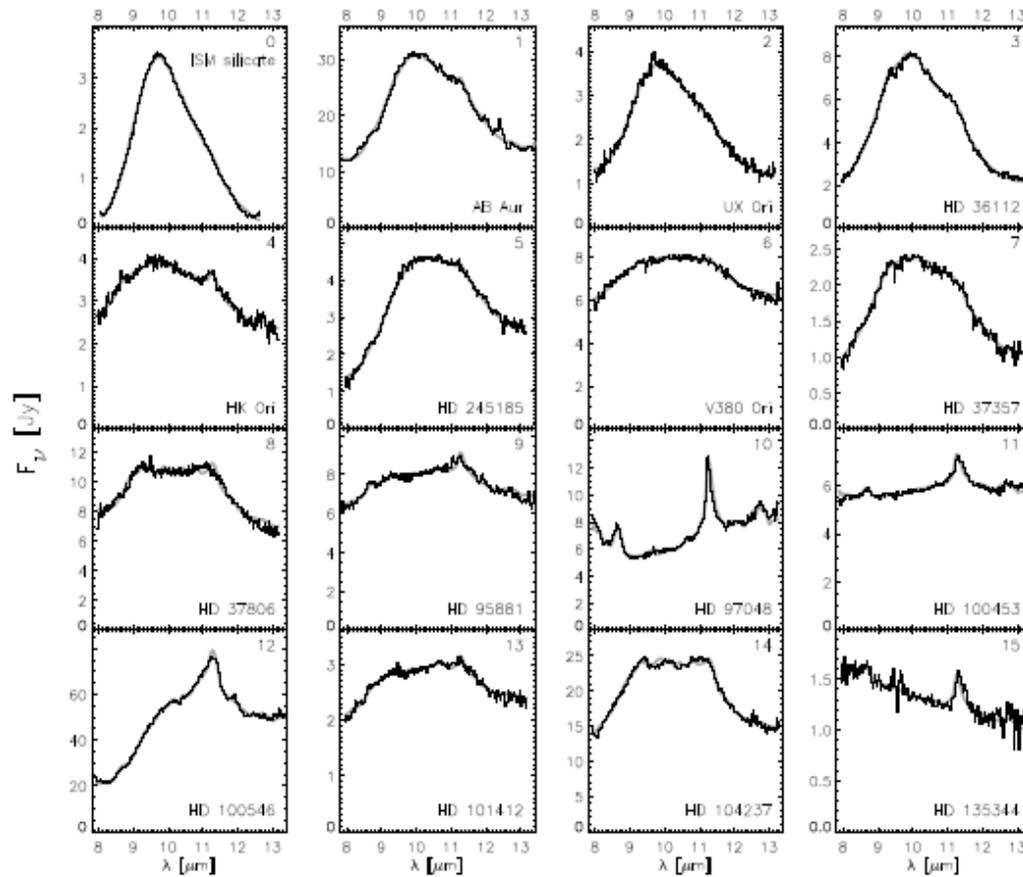


Fig. 4. N-band spectra of the sources in our sample. The ISM silicate extinction efficiency, plotted in the upper left panel, was taken from Kemper et al. (2004). The AB Aur spectrum was taken by ISO (van den Ancker et al. 2000). Also plotted are the best fits to the spectra (grey curves, see section 5.2).

Le rapport de flux droite/gauche  
donne une estimation du degres  
de cristallisation des grains

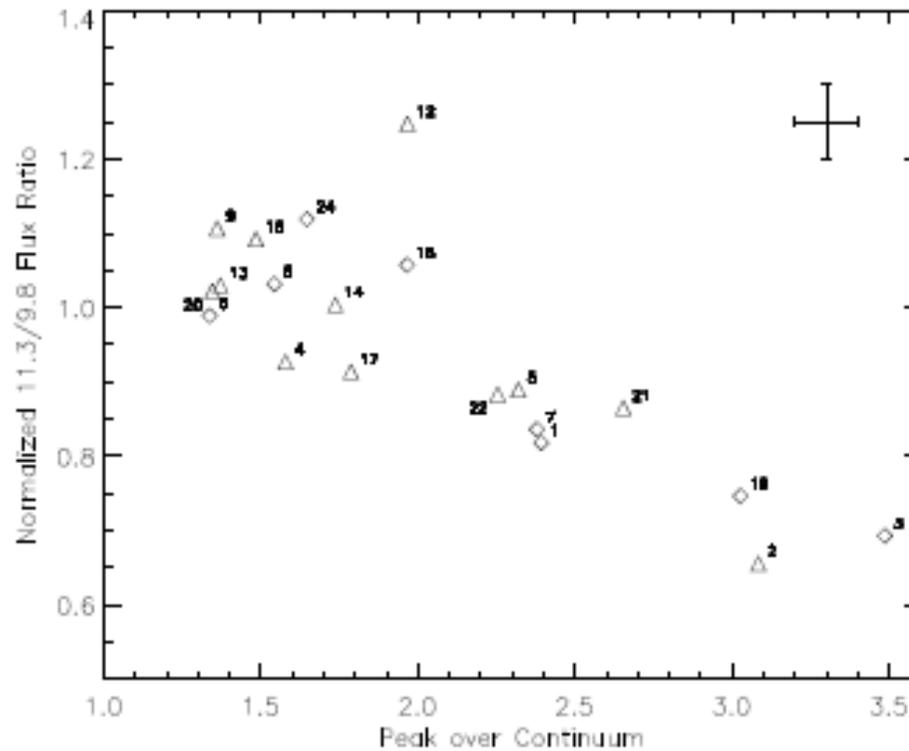
Le rapport du pique/ continuum  
donne une idee de la taille des grains

(les gros grains ont peu de details

$$\lambda \sim 10 \text{ microns}$$

Degrés de cristallisation

Taille des grains

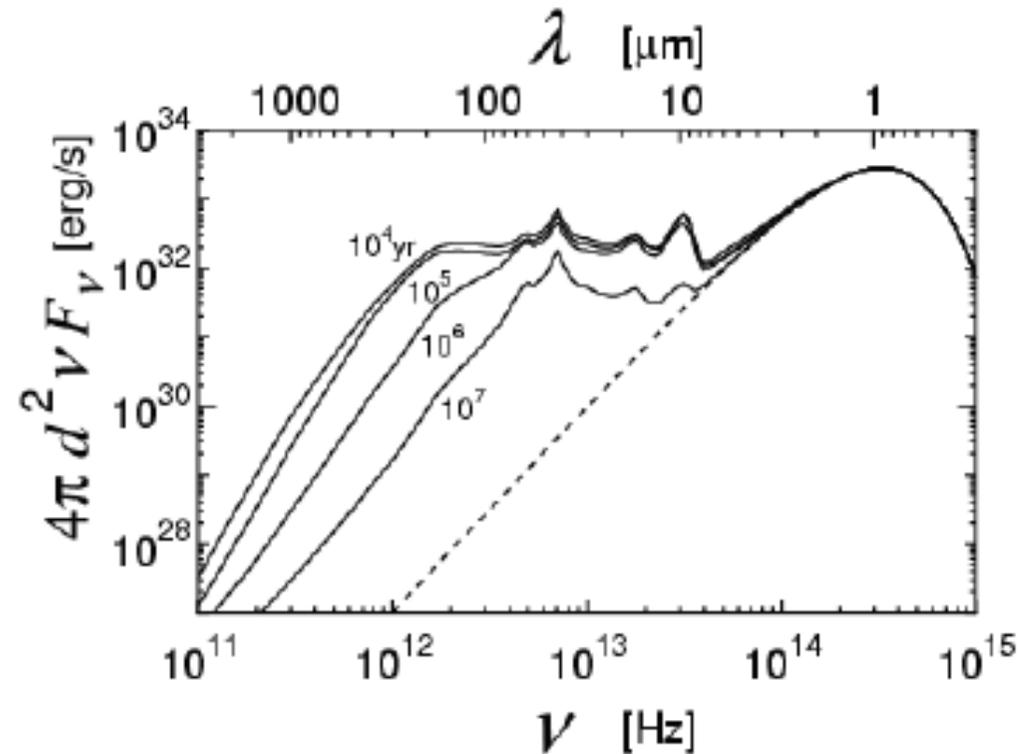


ON VOIT LA  
CRISTALLISATION !!!

Fig. 6. The flux ratio of the normalized spectra at 11.3 and 9.8 micron (a measure for the amount of processing that the material has undergone) versus the peak/continuum ratio of the silicate feature (a measure for the typical grain size). Group I sources are represented by triangles, group II sources by diamonds. In the upper right corner of the figure we have indicated the typical uncertainties in the displayed quantities.

Mais ne c'est pas tout ! On voit aussi la sédimentation (diminution de l'opacité)

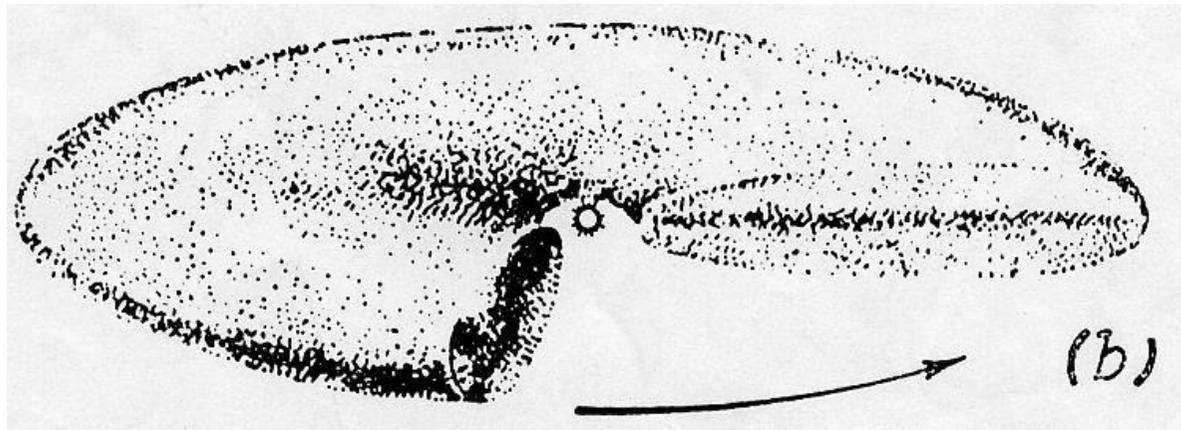
### SED Evolution due to Dust Growth & Settling



Depletion of infrared excess at  $t > 10^7$  yr  
can be explained by dust growth and settling!

# MIGRATION RADIALE DES GRAINS

*Un problème majeur du scénario de formation planétaire*



Les grains frottent contre le gaz  
=> ils perdent de l'énergie  
=> Ils migrent

A quelle vitesse ?

On se place dans le référentiel cylindrique

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\phi^2}{r} = -r\Omega_k + F_f$$

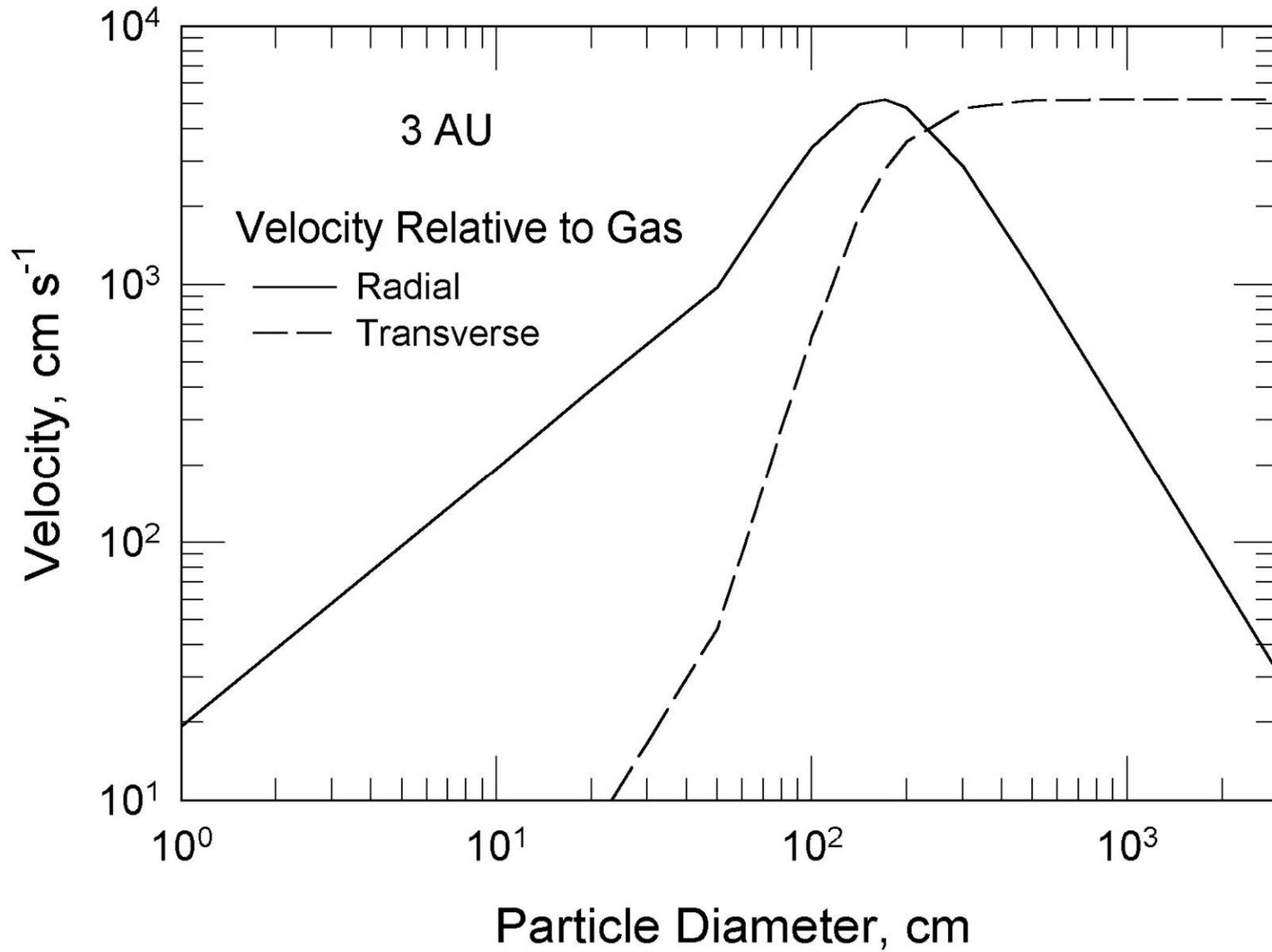
0 en régime  
stationnaire

$\ll V_{\text{phi}}^2/R$

gravité

Frottement

Epstein ?  
Stockes ?



Weidenschilling, 1982

Les particules les plus sensibles sont celles  $\sim 1\text{m}$

Les particules de  $1\text{m}$  chutent sur l'étoile en moins de 100 ANS

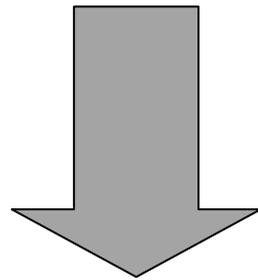
→ Un des plus gros problèmes de la théorie de la formation des planètes !!

→ Il faut grandir du CM au KM en un temps très court...  
nécessité d'un mécanisme efficace !

Le mince disque de gros grains devient INSTABLE (?)

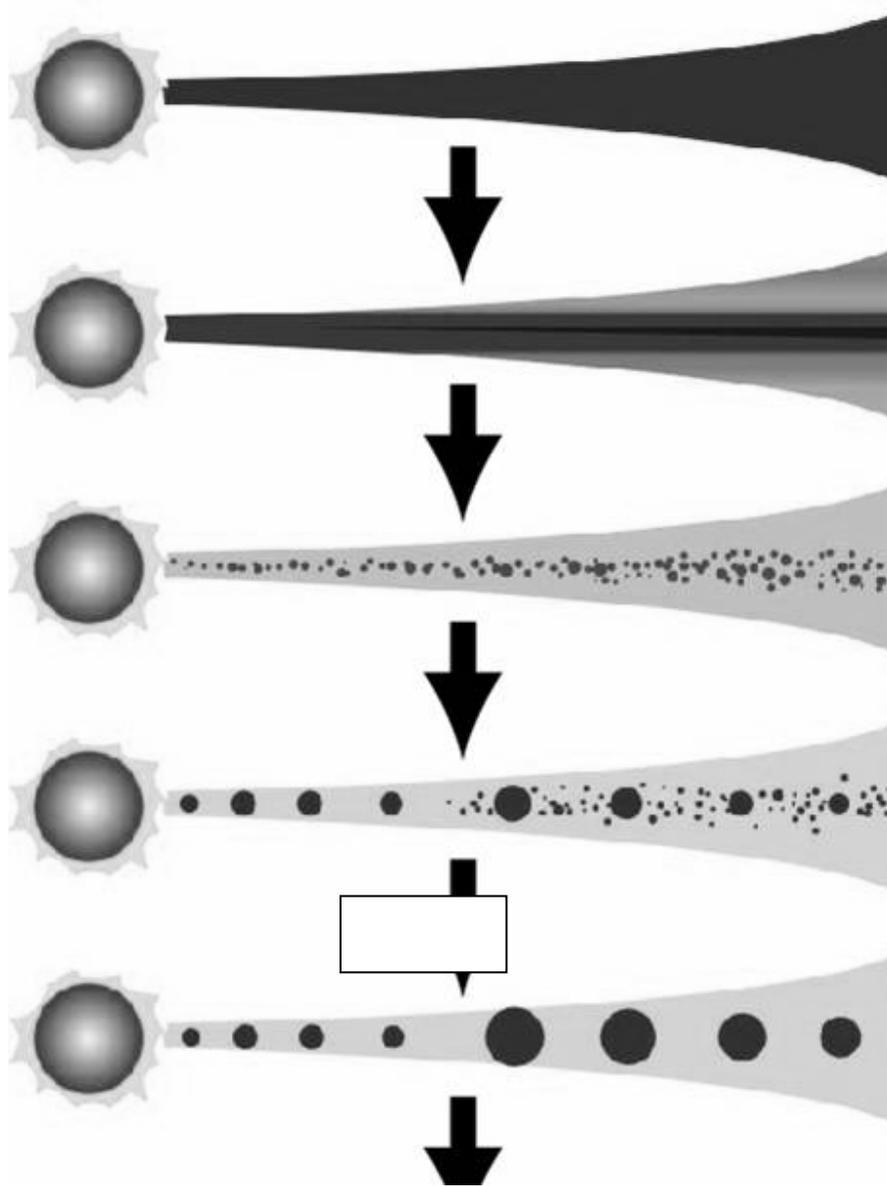
en raison de la gravité des grains (?)

Turbulence (?)



Il doit exister un Processus de collage TRES efficace  
« super-grains » de 10 km : PLANETESIMAX

# Les 5 étapes de la formation planétaire



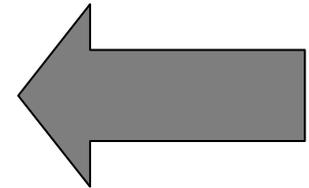
Disque de gaz + grains

Les grains sédimentent

**Planétésimaux**

Embryons planétaires

Planètes



# Formation des Planétésimaux

Quel mécanisme peut agir en moins de 100 ans ?

=> Idée de l'instabilité gravitationnelle ... mais qq problèmes

Il existe une densité critique au delà de laquelle l'instabilité gravitationnelle s'installe :

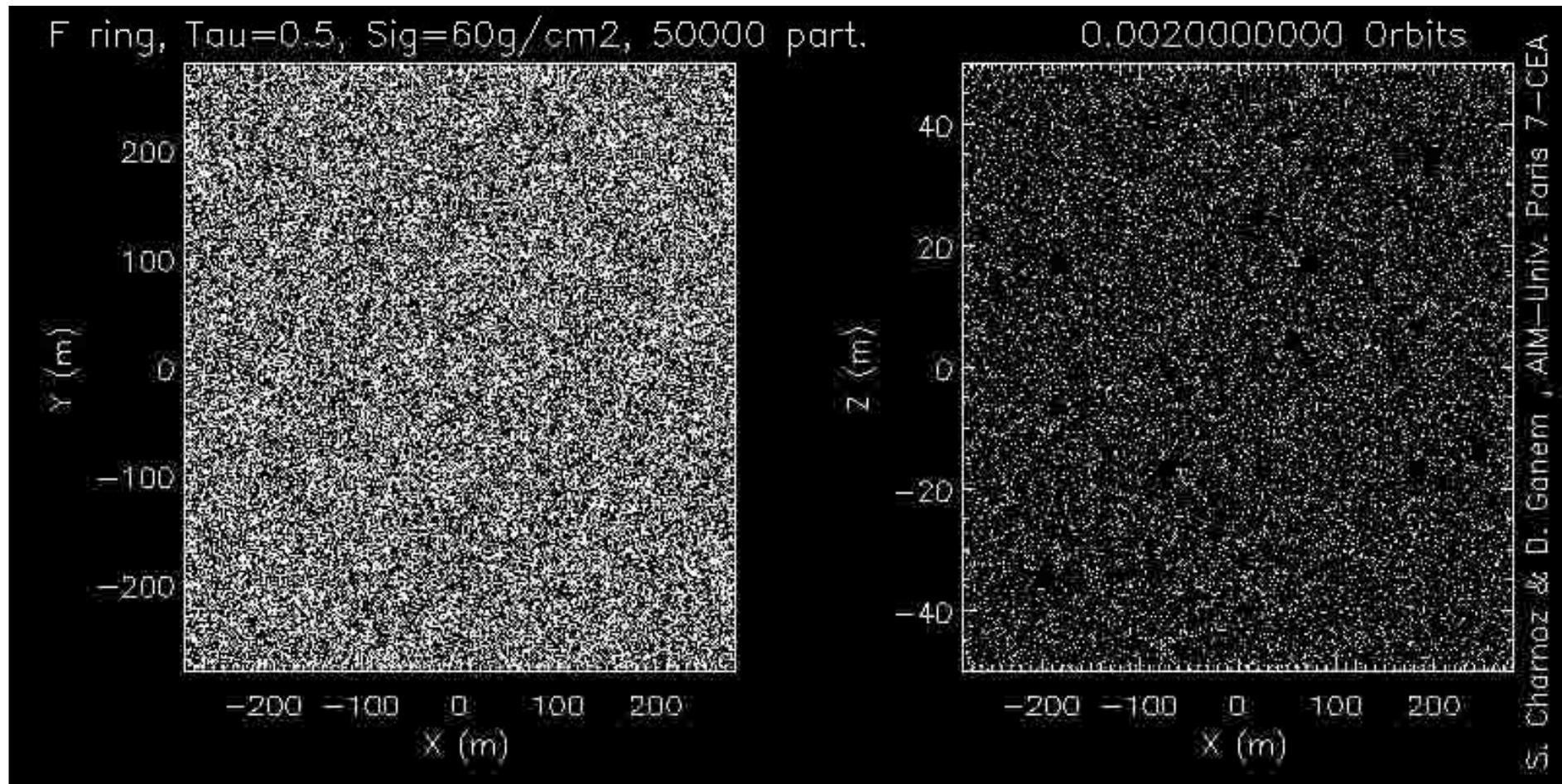
# Critère d'instabilité de Toomre

$$Q \equiv \frac{\Omega C_s}{G\Sigma} < \frac{\pi}{2}$$

$Q < 1$  : instable     $Q > 1$  : Stable

En posant  $Q < 1$  on en déduit une « densité de surface critique » pour déclencher L'instabilité gravitationnelle

Dans l'anneau F de Saturne, processus très similaire



Simulation : S. Charnoz, 2005, Simulation périodique, gravité + dissipation

« Taille des grumeaux » :  
Longueur d'onde de Jeans

$$\lambda \approx \frac{4\pi a^3 \Sigma}{M_*}$$

Pour les planètes géantes :

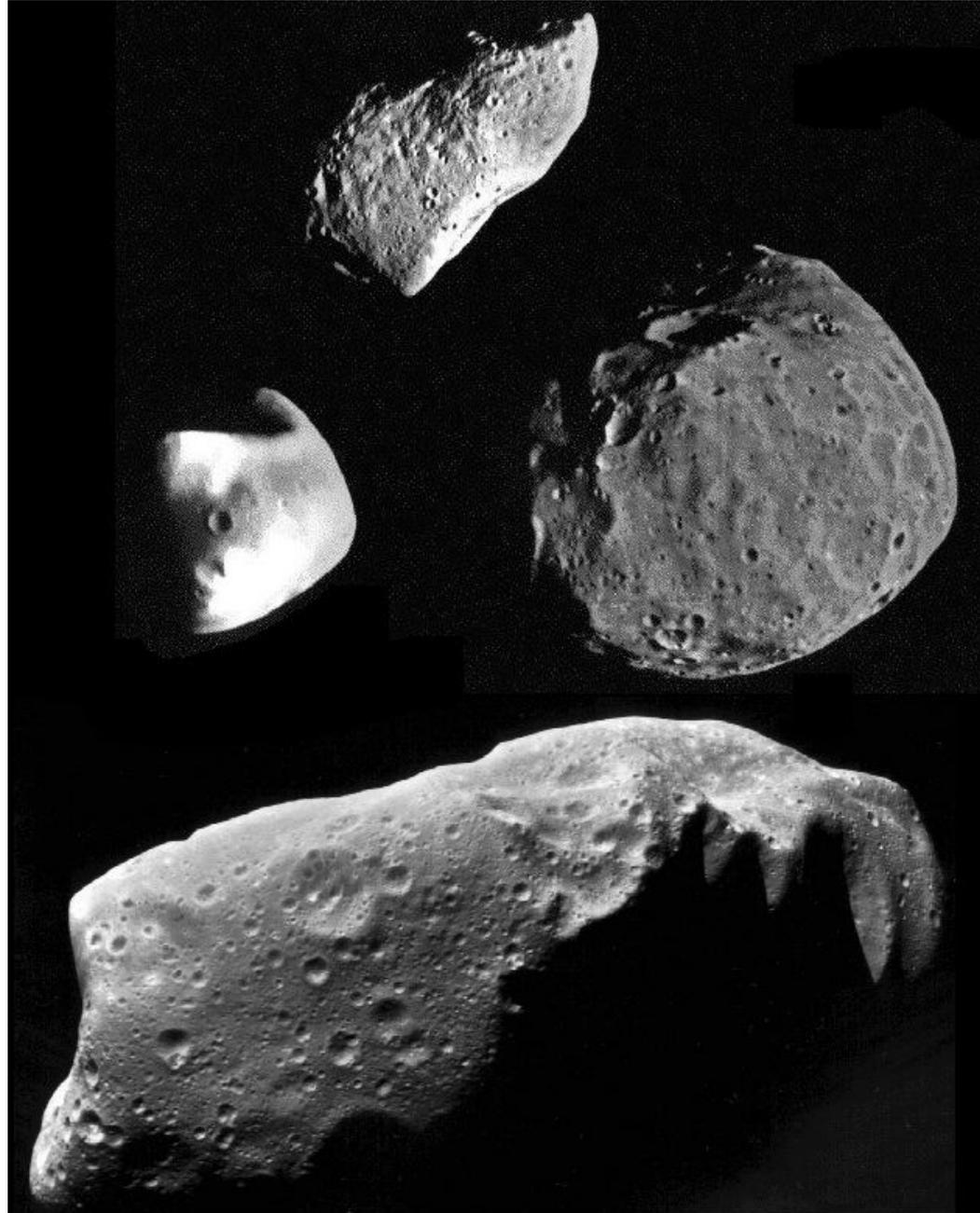
$$\begin{aligned} \rho_{cr} &= 2 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3 & H &= 10^{10} \text{ cm} \\ m &= 10^{21} \text{ g} & D &= 100 \text{ km}, & \rho &= 1 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

.

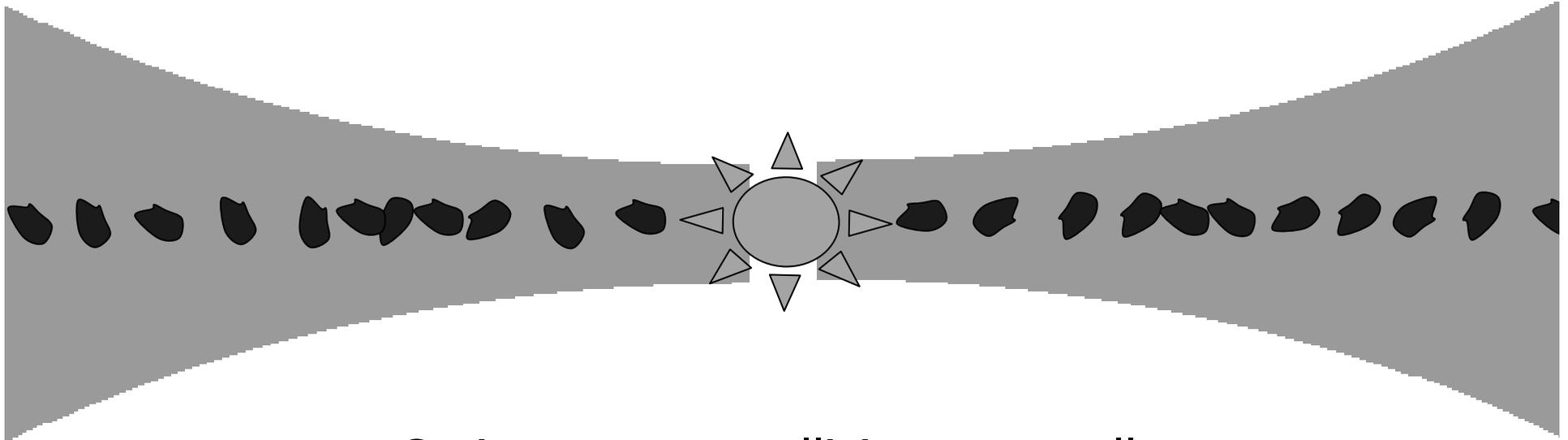
*Dans la région des planètes telluriques*

*$H\rho$  : comparable  $\rho$  : 100 fois plus grande  
corps de 5 km*

# PLANETESIMAUX



# L'époque des planétésimaux



Croissance par collisions mutuelles

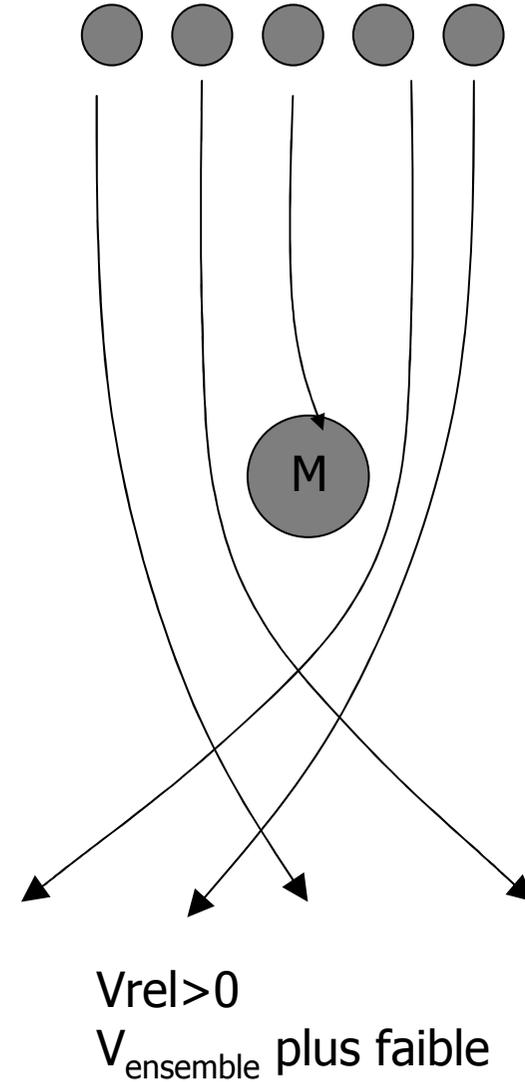
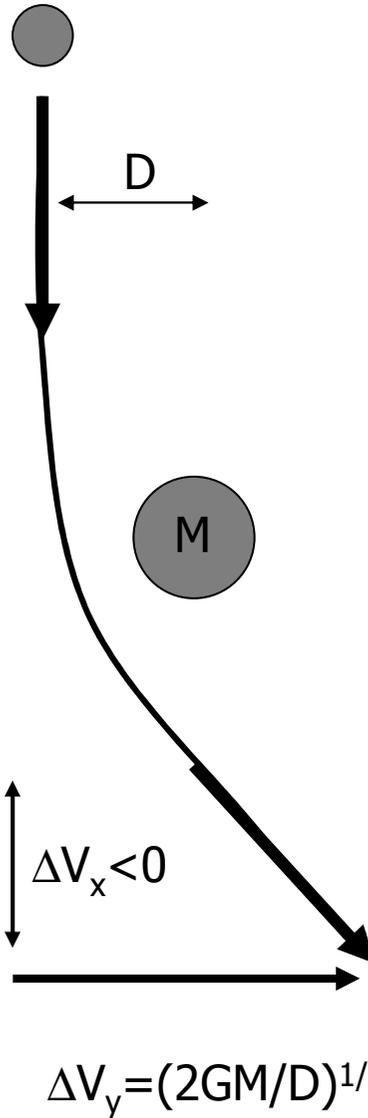
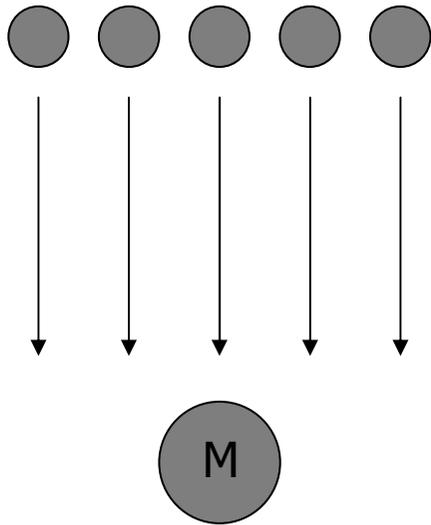
# Les rencontres gravitationnelles :

(1) Augmentent  $V_{rel}$ .

(2) **Diminuent la vitesse d'ensemble**

*Friction Dynamique*

$V_{rel}=0$



# Un équilibre s'établit

$$V_{\text{relatif}} \sim V_{\text{evasion}}$$

des corps qui dominant la masse du système

$$\sim 10 \text{ m/s}$$

Remarque : Disque très « froid » car  $V_{\text{rel}} \lll V_{\text{orbitale}}$

**Les planétésimaux vont continuer à grandir par collisions mutuelles**

## MISE EN EVIDENCE DE L'EFFET BOULE DE NEIGE

Soit une population de corps de masse  $m_2$ , dans lequel sont plongés un gros corps de masse  $m_1$  ( $m_1 > m_2$ )

Le taux d'accrétion de  $m_1$  est :

Nb de corps  $m_2$  / volume

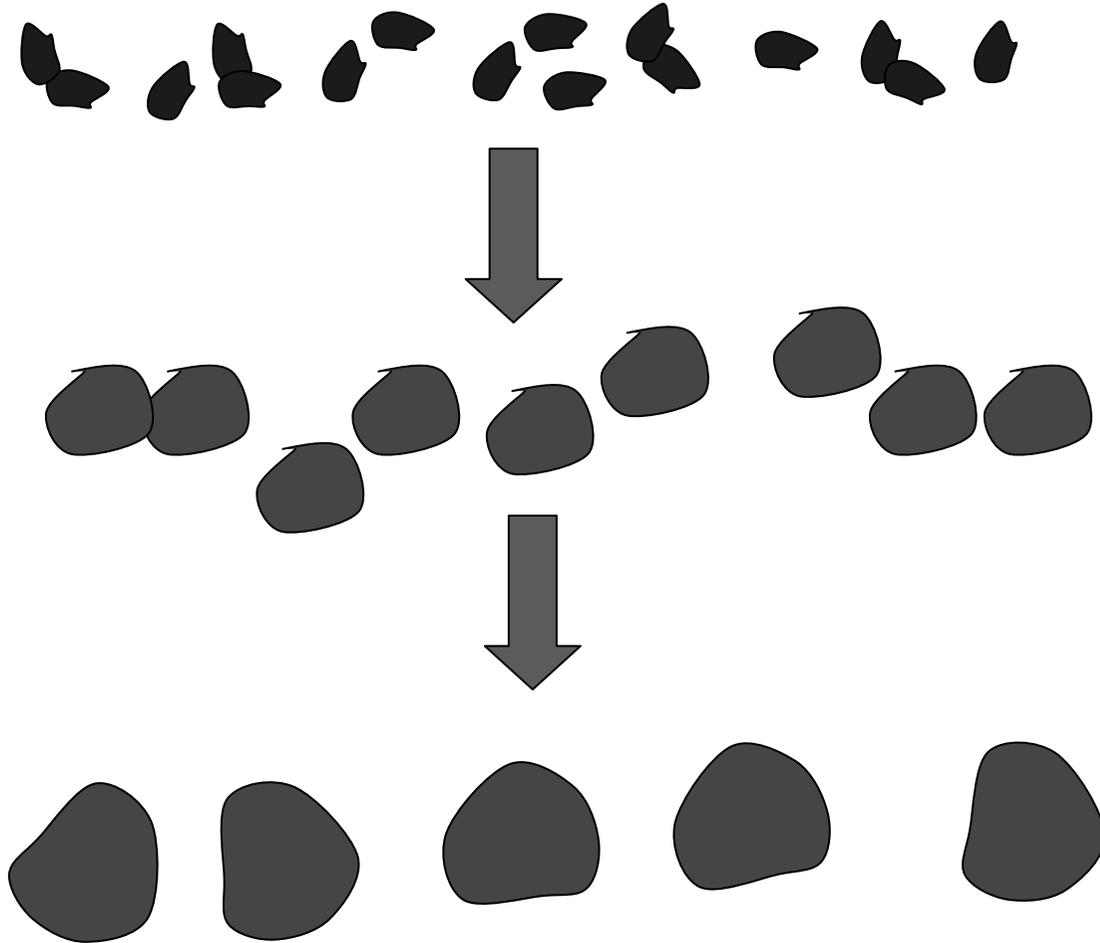
Section efficace

$$\frac{dm_1}{dt} = m_2 \rho_2 V_{12} \pi_1^2 \left[ 1 + \left( \frac{V_e(1)}{V_{12}} \right)^2 \right]$$

Vitesse d'impact = Vitesse relative + Vitesse d'évasion

# ECOLE SOVIETIQUE : Safronov (1969)

Croissance ordonnée des corps



Problèmes:

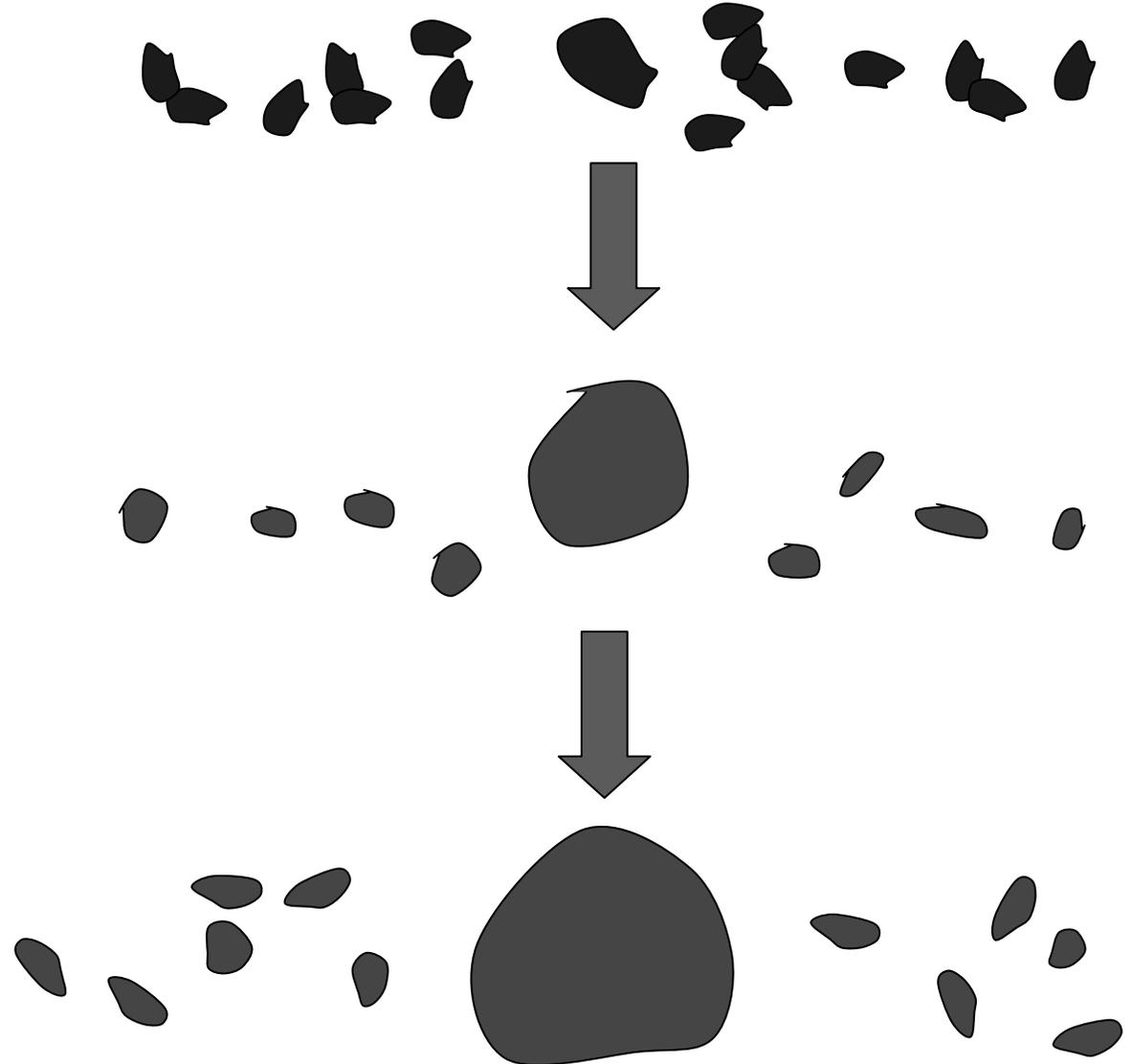
Croissance trop lente , 100 millions A.

Une multitude de petites planètes

# ECOLE AMERICAINE :

Greenberg , Weidenschilling, Wetherill ...

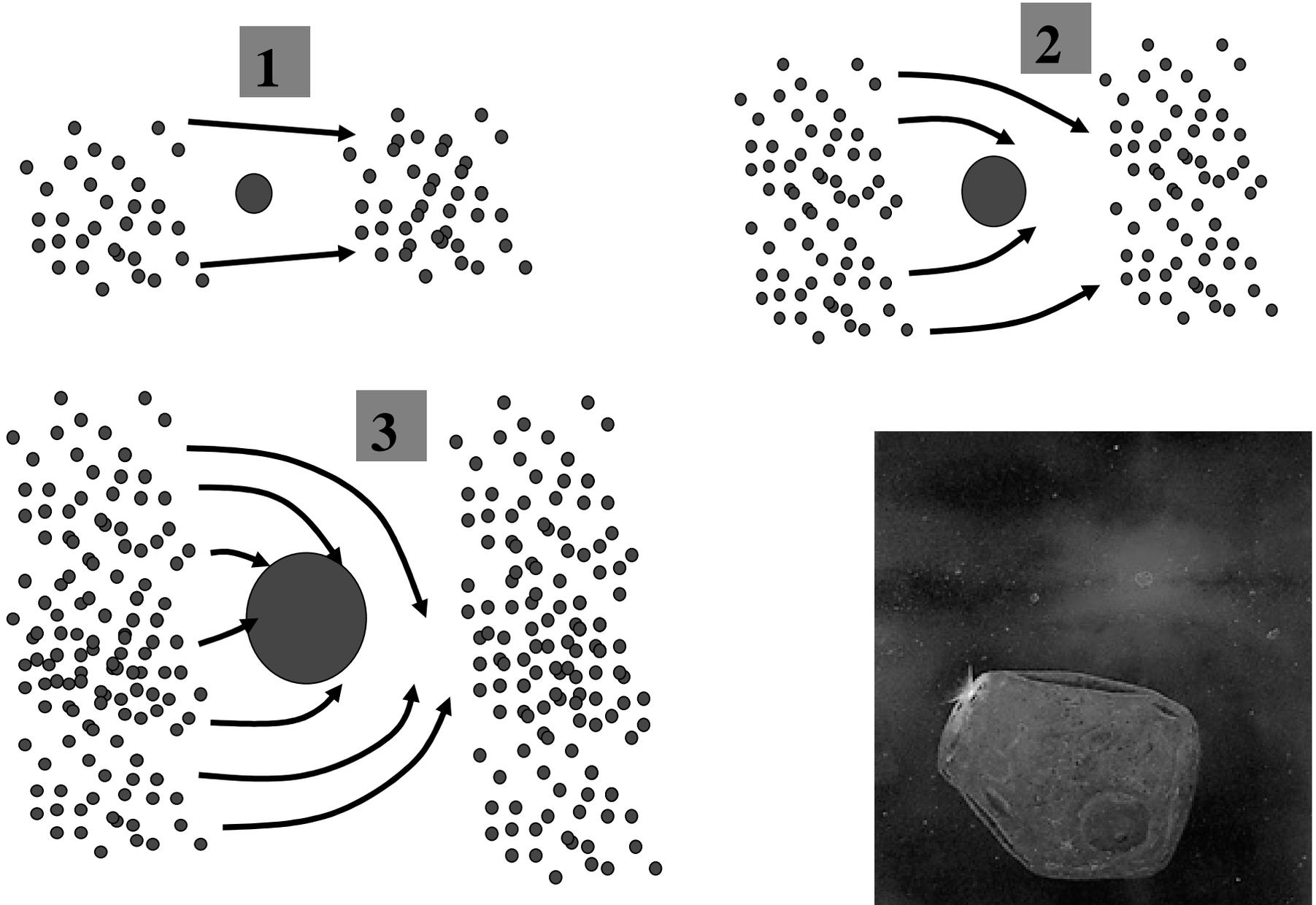
## **Croissance par effet “Boule de Neige” “Les plus gros grandissent les plus vite”**



Mécanisme TRES  
rapide : 100,000 ans

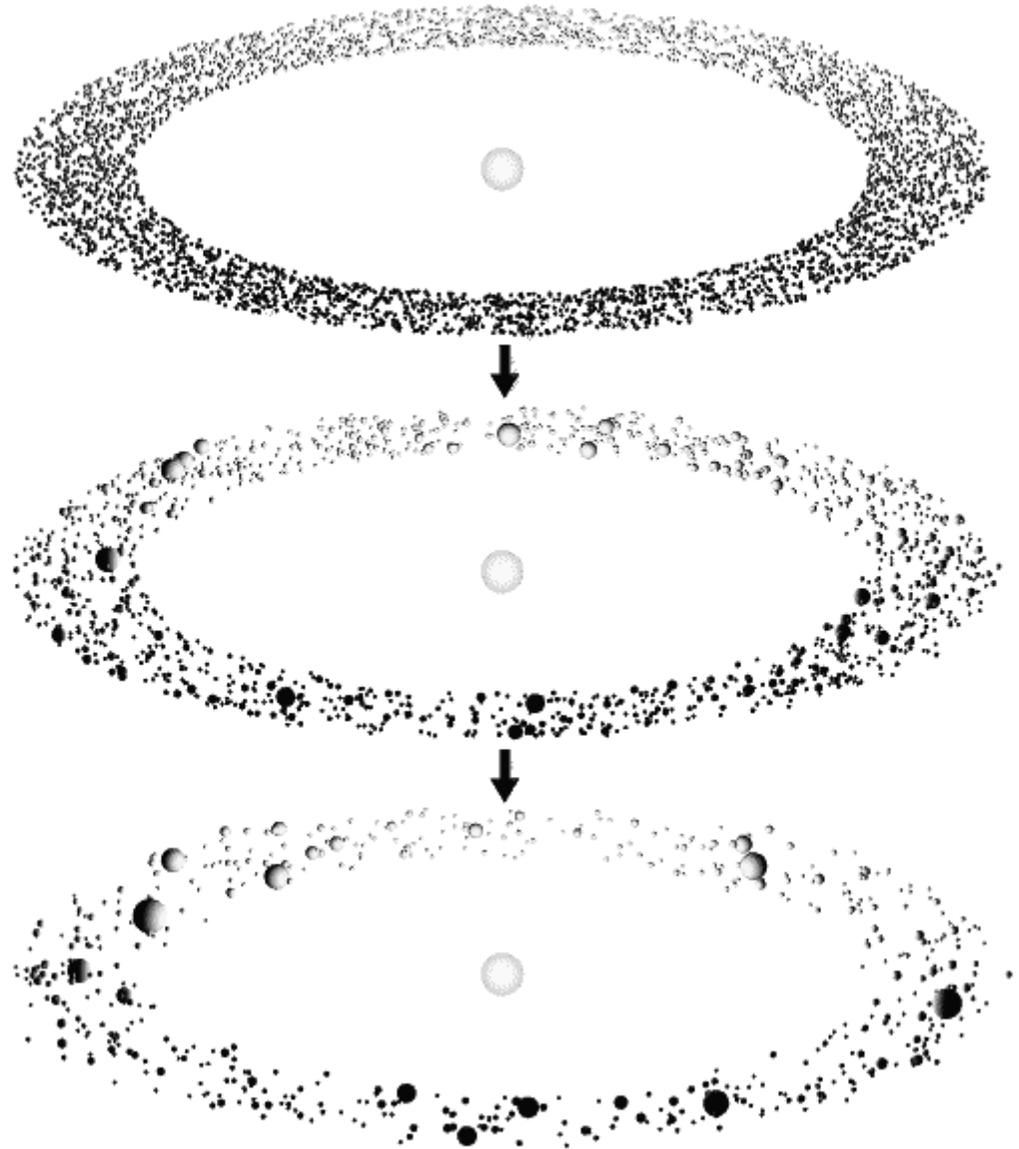
# L'effet « Boule de Neige »

*Runaway Growth*



# Une simulation Numérique

**Apparition de  
protoplanètes  
(taille lunaire  
à martienne)**



## PHYSIQUE DE L'EFFET BOULE DE NEIGE

Deux corps s'accrètent si leur vitesse d'impact est < vitesse de libération

$$V_{impact} < \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Donc plus les vitesses de rencontre sont faibles,  
Plus l'accrétion est efficace

Le paramètre contrôle l'efficacité de l'accrétion est :

$$\theta = V_e / V_i$$

## Mise en évidence de l'effet Boule de Neige

Comparons les vitesses de croissances de 2 populations...

Soit une population de corps de masse  $m_2$ , dans lequel sont plongés un gros corps de masse  $m_1$  ( $m_1 > m_2$ )

Le taux d'accrétion de  $m_1$  est :

Nb de corps  $m_2$  / volume

Section efficace

$$\frac{dm_1}{dt} = m_2 \rho_2 V_{12} \pi_1^2 \left[ 1 + \left( \frac{V_e(1)}{V_{12}} \right)^2 \right]$$

De même pour les corps m2 :

$$\frac{dm_2}{dt} = m_2 \rho_2 V_{22} \pi_2^2 \left[ 1 + \left( \frac{V_e(2)}{V_{22}} \right)^2 \right]$$

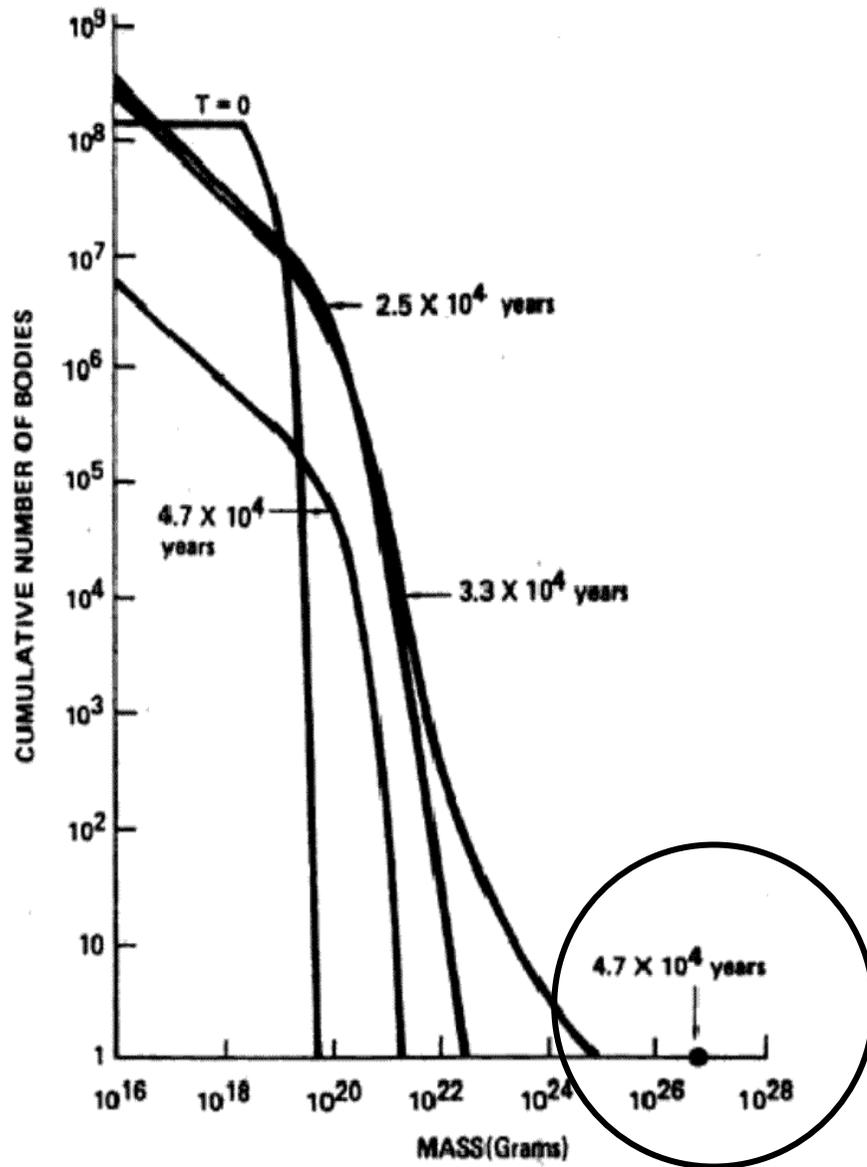
Alors si on compare les 2 taux d'accrétion :

$$\frac{m_2}{m_1} \frac{dm_1/dt}{dm_2/dt} = \frac{1}{R} \frac{1 + \left( \frac{V_e(1)}{V_{12}} \right)^2}{1 + \left( \frac{V_e(2)}{V_{22}} \right)^2} = \frac{1}{R} \left[ \frac{1 + 2\theta_1}{1 + 2\theta_2} \right]$$

$\theta$  : rapport de la vitesse d'évasion/ v. impact

Si toute la masse reste dans les petits corps, alors  $\theta_1 \gg 1$  et  $\theta_2 \sim 1$ ..... le terme de droite  $\gg 1$  : m1 grandit beaucoup plus vite !!

$dM/dt \propto M^{4/3}$  en régime « runaway » (Ida & Makino 1993)



Simulation d'accrétion  
(Greenberg 1978)

Embryon planétaire

Par ce processus on crée un population **d'embryons planétaires**

À 1 AU : le temps est d'environ  $10^5$  ans

# La fin de l'effet Boule de neige : *La Masse d'Isolation*

L'effet boule de neige ne peut continuer indéfiniment

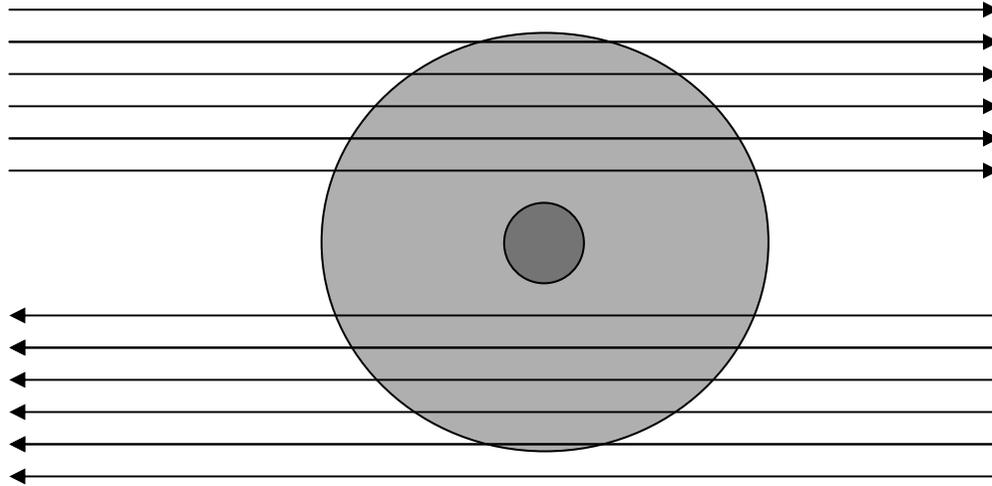
CAR

Augmentation des vitesses  
relative car la masse est  
Transférée dans des gros  
Corps

$$(V_{\text{equil}} \sim V_{\text{evasio}})$$

Le matériau se vide

# MASSE D'ISOLATION



Un corps de masse  $M$  peut accréter du matériau  
À l'intérieur de  $\sim 4$  rayons de Hill

$$R_h = R \left( \frac{M_{\text{corps}}}{3M_*} \right)^{1/3}$$

Paramétrisation simple :

$$M_i \sim 0.3 M_{\oplus} \left( \frac{r}{1 \text{ ua}} \right)^3 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{1 \text{ UA}}} \right)^2$$

Masse d'isolation

$$T \approx \frac{10^5 \text{ ans}}{\sigma / \sigma_{\oplus}} \left( \frac{r}{1 \text{ ua}} \right)^{3/2}$$

Temps d'accrétion

Pour la Terre :

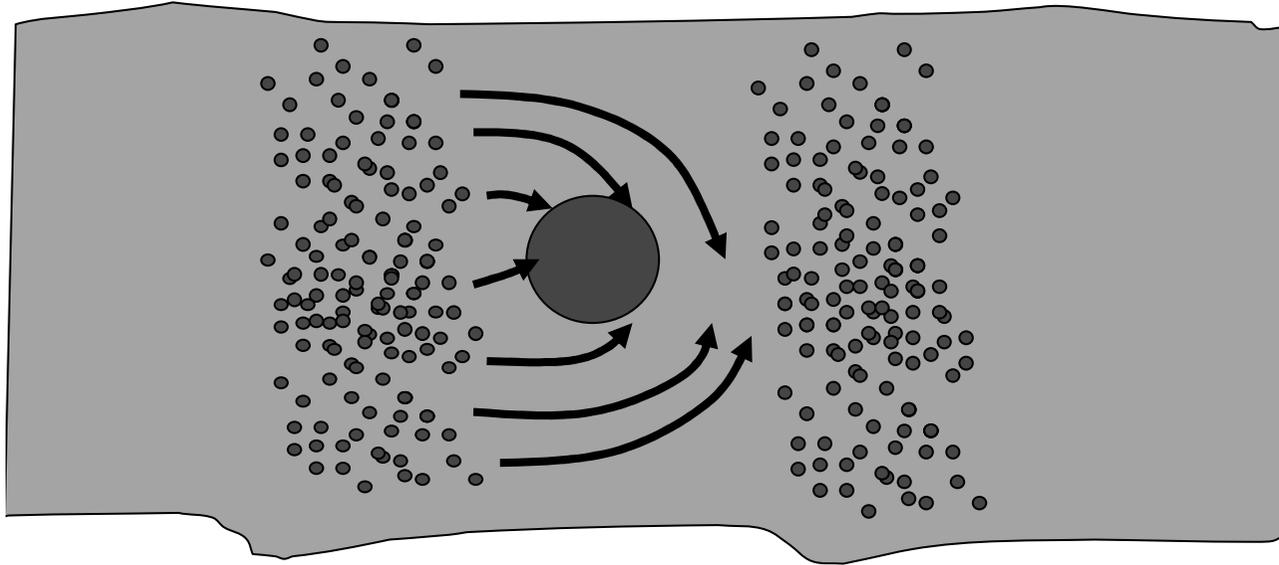
$\sim 0.3 M_{\oplus}$  en  $10^5$  ans

Pour Jupiter :

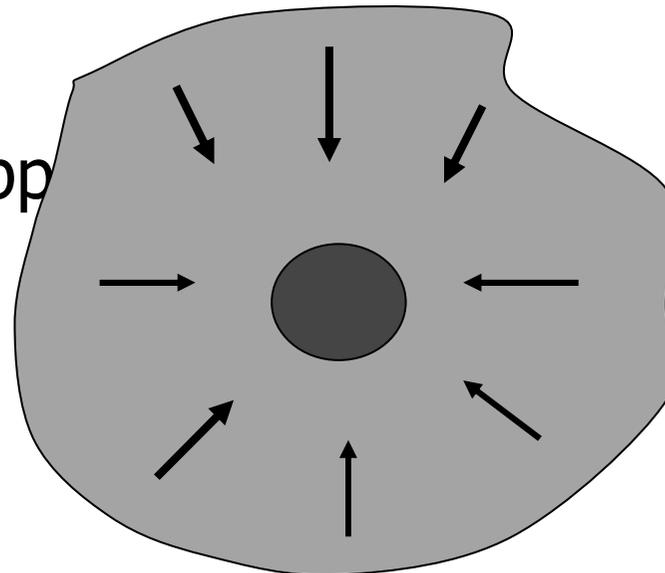
$\sim 30 M_{\oplus}$  en  $10^6$  ans

# Croissance des planètes géantes gazeuses

1- Accrétion « Boule de Neige » au milieu du gaz



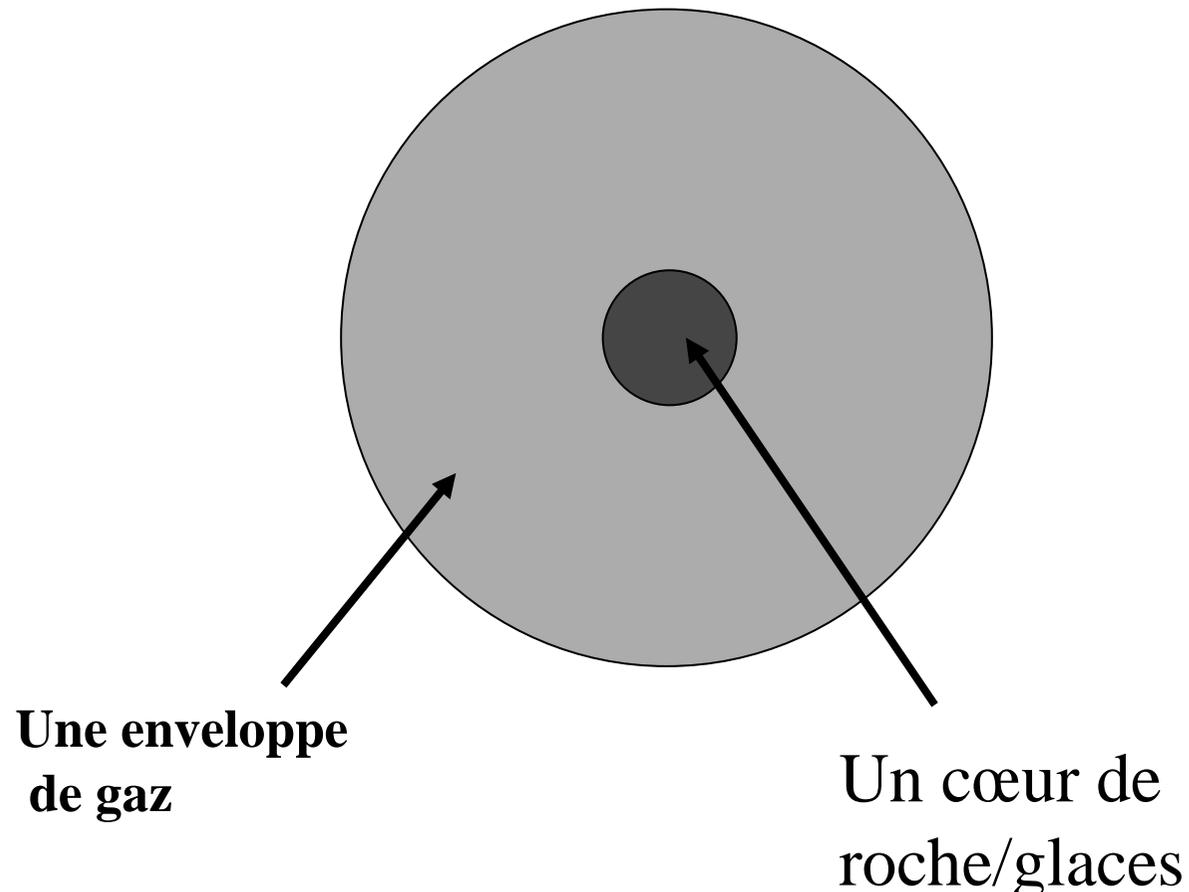
2- Accrétion d'une enveloppe



➤ **Emballement de l'accrétion d'une enveloppe de gaz**

➤ **Effondrement rapide sur la planète**

**RESULTAT :**



Le disque de gaz se dissipe en  $10^7$  ans  
(photo-evaporation)

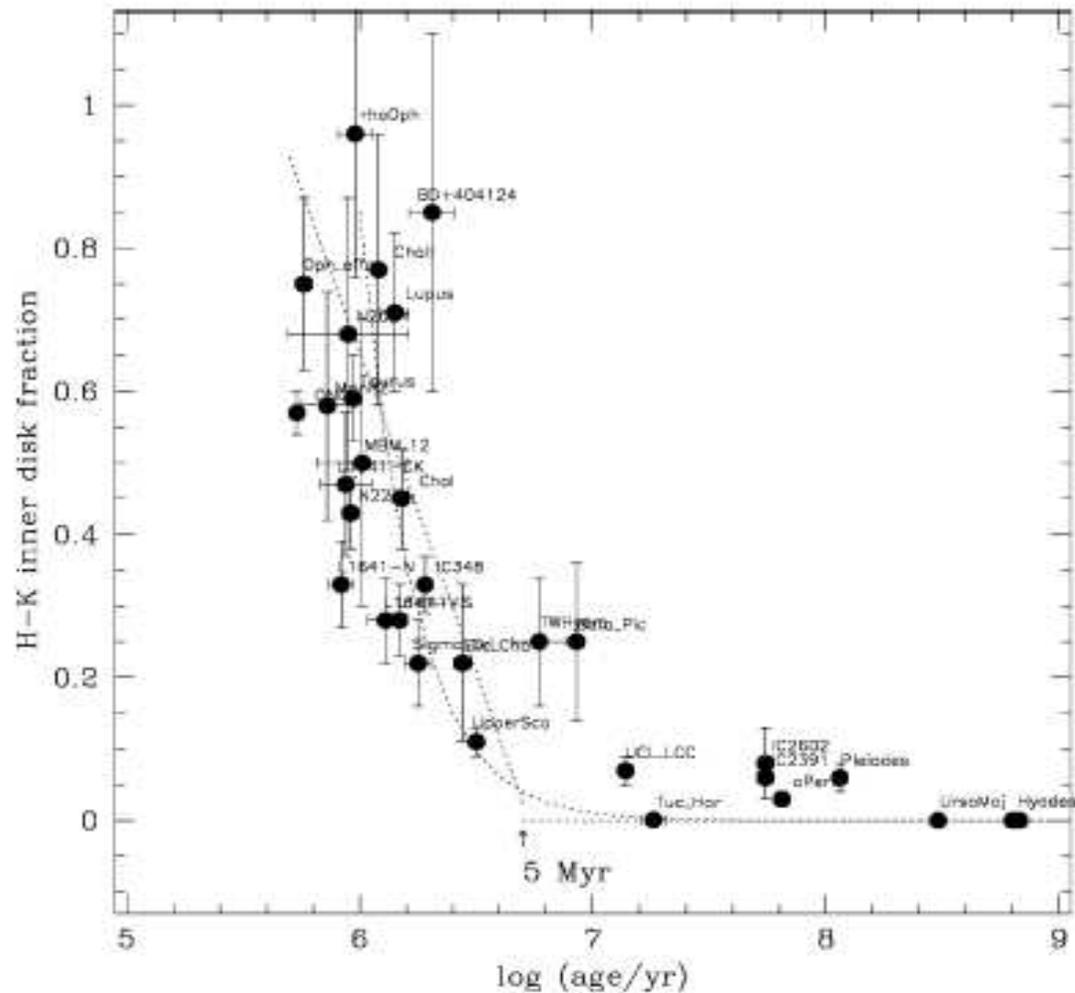
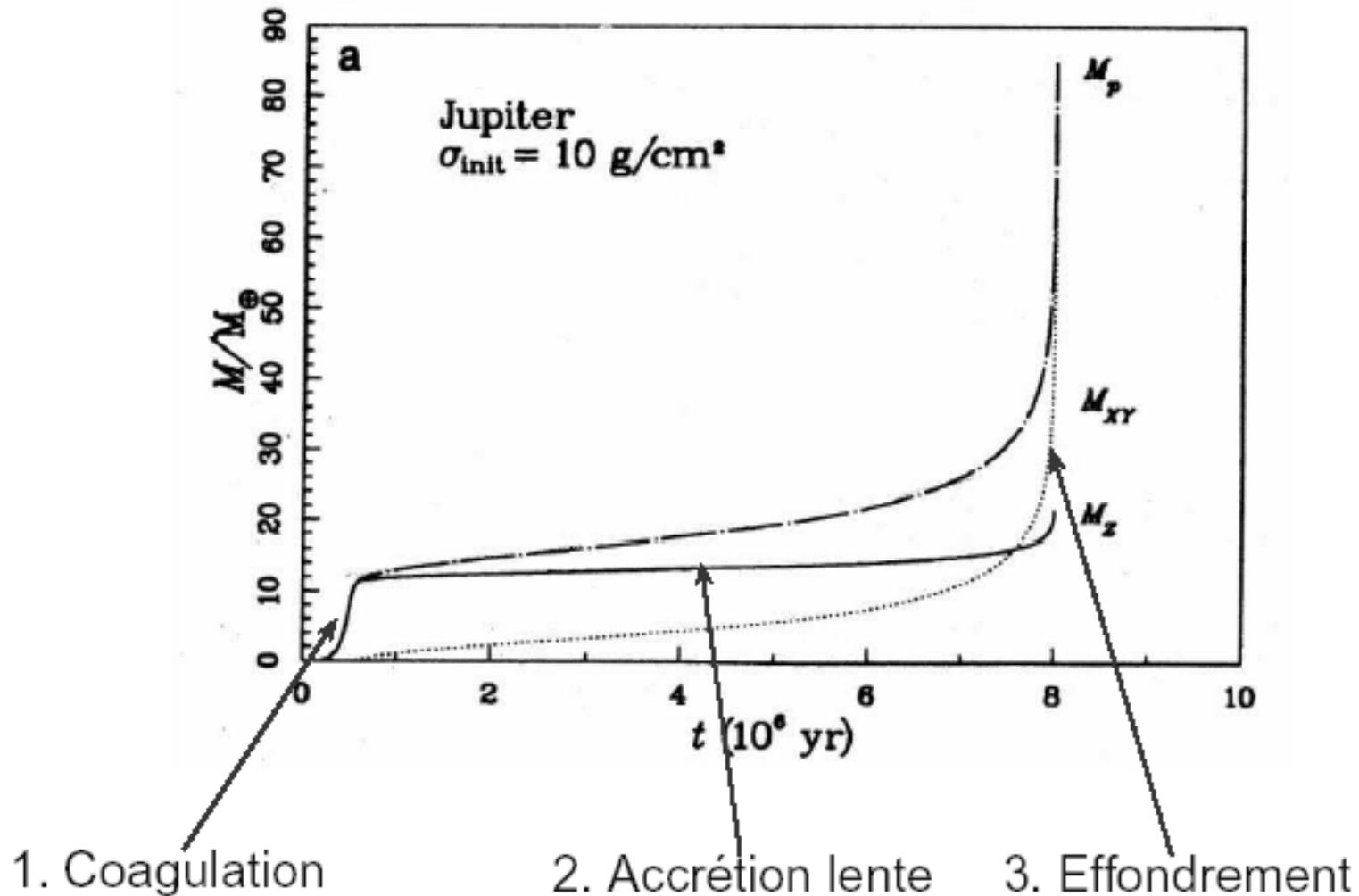


Figure 3.11. Disk fraction in young stellar clusters, as a function of their age. This fraction is consistent with 100% at young ages (less than 1 Myr), then declines over a timescale of a few Myr. After 10 Myr, with a few exceptions, all the disks around young stars have disappeared, presumably because of planet formation (Hillenbrand, 2006). This puts strong constraints on the formation of giant planets (which cannot be seen themselves).

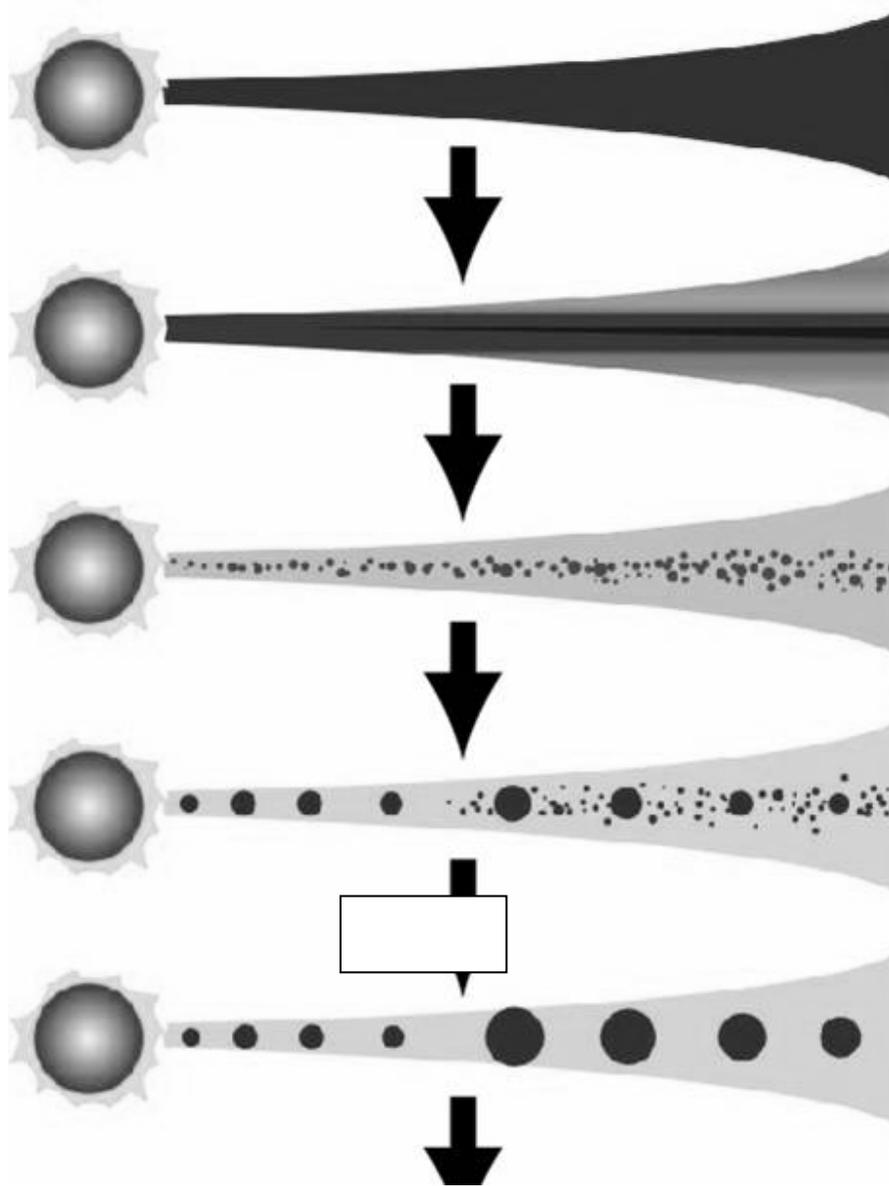
# Formation des planètes géantes

Pollack et al. 1996



*Uranus et Neptune n'ont jamais atteint la troisième phase.*

# Les 5 étapes de la formation planétaire



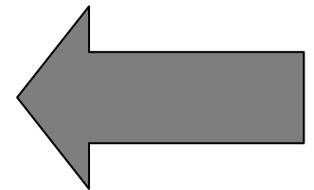
Disque de gaz + grains

Les grains sédimentent

Planétésimaux

**Embryons planétaires**

Planètes

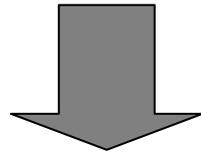


# L'époque des protoplanètes

**Quelques centaines de protoplanètes sont présentes entre 0.5 et 5 UA**

**Elles se perturbent mutuellement**

**Elles entrent en collision**



**Quelques planètes  
seulement survivent**

Phase très étudiée actuellement



# Les perturbations gravitationnelles Permettent de sortir de l'isolement

Les embryons se perturbent mutuellement

$$dv \sim (2GM_{\text{embryo}}/\Delta r)^{1/2} \Rightarrow e \sim dv/V_{\text{orb}}$$

avec  $V_{\text{orb}} = R(GM_*/R^3)$

E augmente  $\Rightarrow$  croisement des orbites

$\Rightarrow$  Collisions géantes

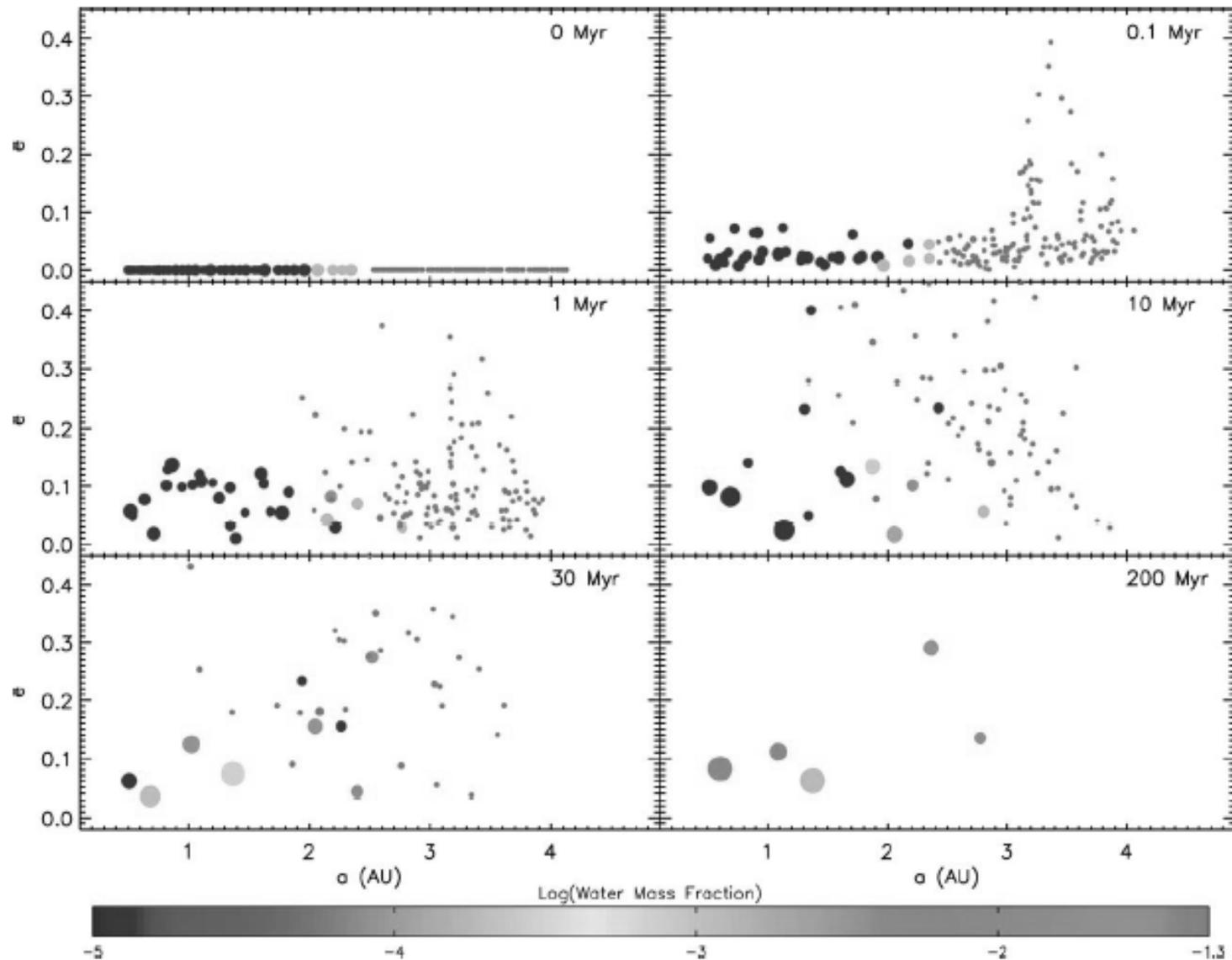
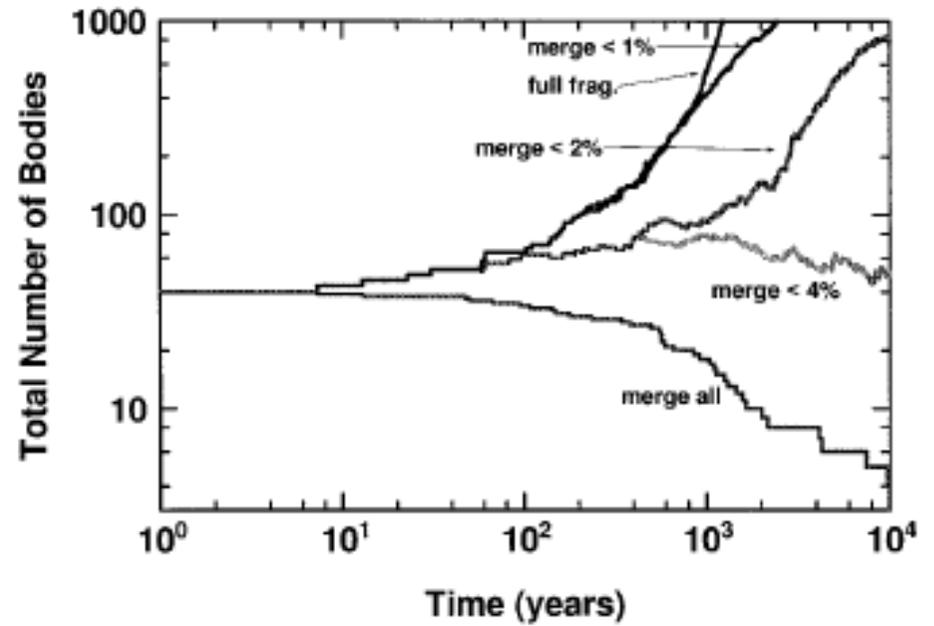
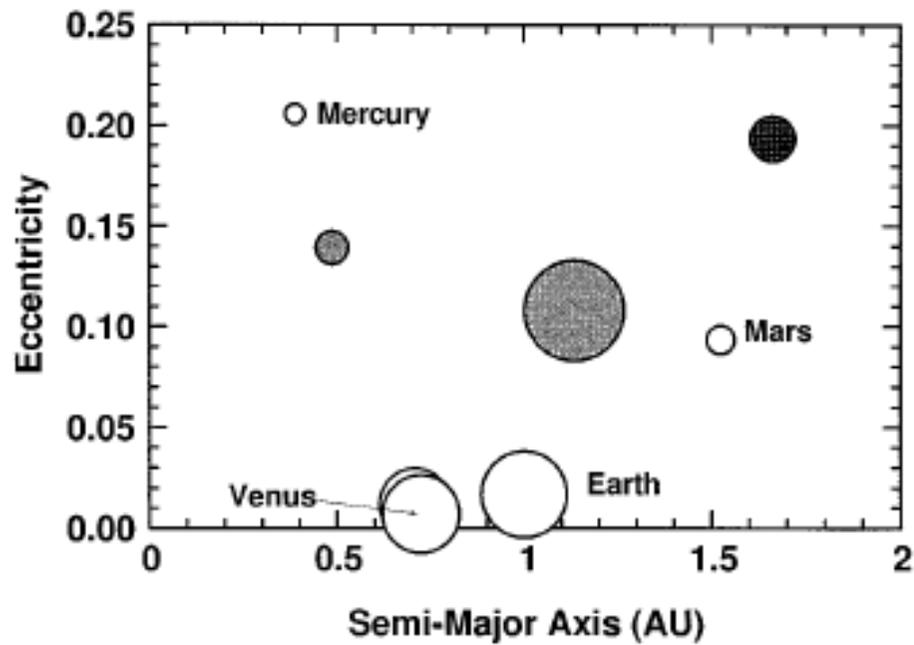
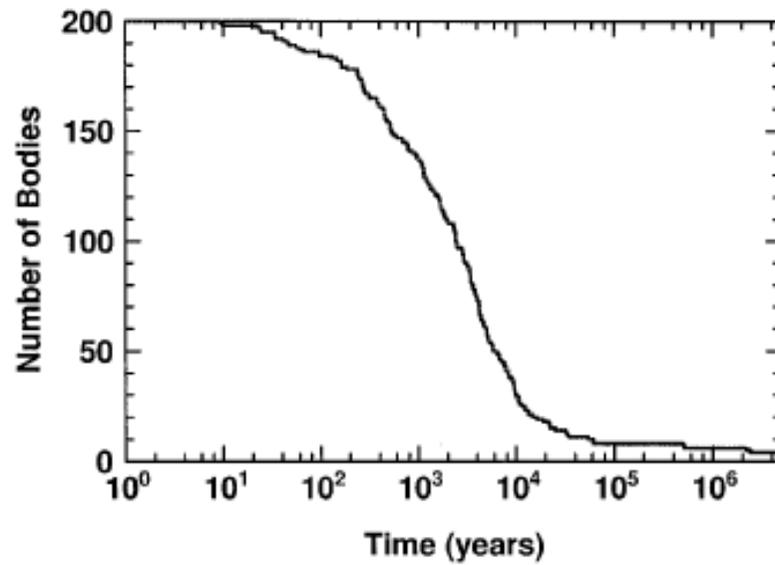
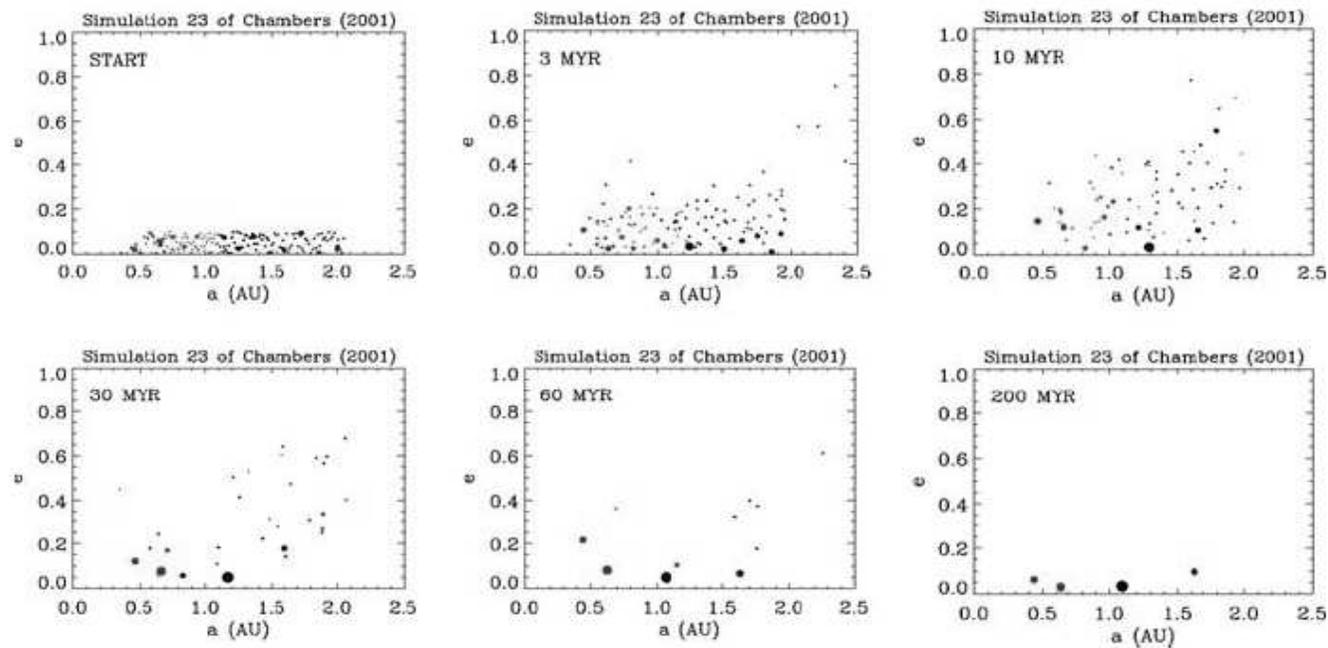


Fig. 3. Snapshots in the evolution of a simulation with Jupiter at 5.2 AU with zero eccentricity, and a planetesimal mass of  $0.01M_{\oplus}$  (simulation 10: see Table 1 for details). The size of each object is proportional to its mass<sup>(1/3)</sup> (but does not represent the actual physical size), and the color of each object corresponds to its water mass fraction. Note that the wettest objects have water mass fractions of  $\log_{10}(5\%) = -1.3$ . See text for discussion.

Alexander & Agnor  
1998





*Figure 3.23.* The growth of terrestrial planets from a disk of planetary embryos. Each panel shows the semi-major axis and eccentricity of the bodies in the system, the size of each dot being proportional to the mass. The color initially reflects the starting position of each embryo. When two (or more) embryos collide, the formed object assumes the color corresponding to the embryo population that has mostly contributed to its total mass. A system of four terrestrial planets, closely resembling our solar system, is formed in 200 Myr. From Chambers (2001).

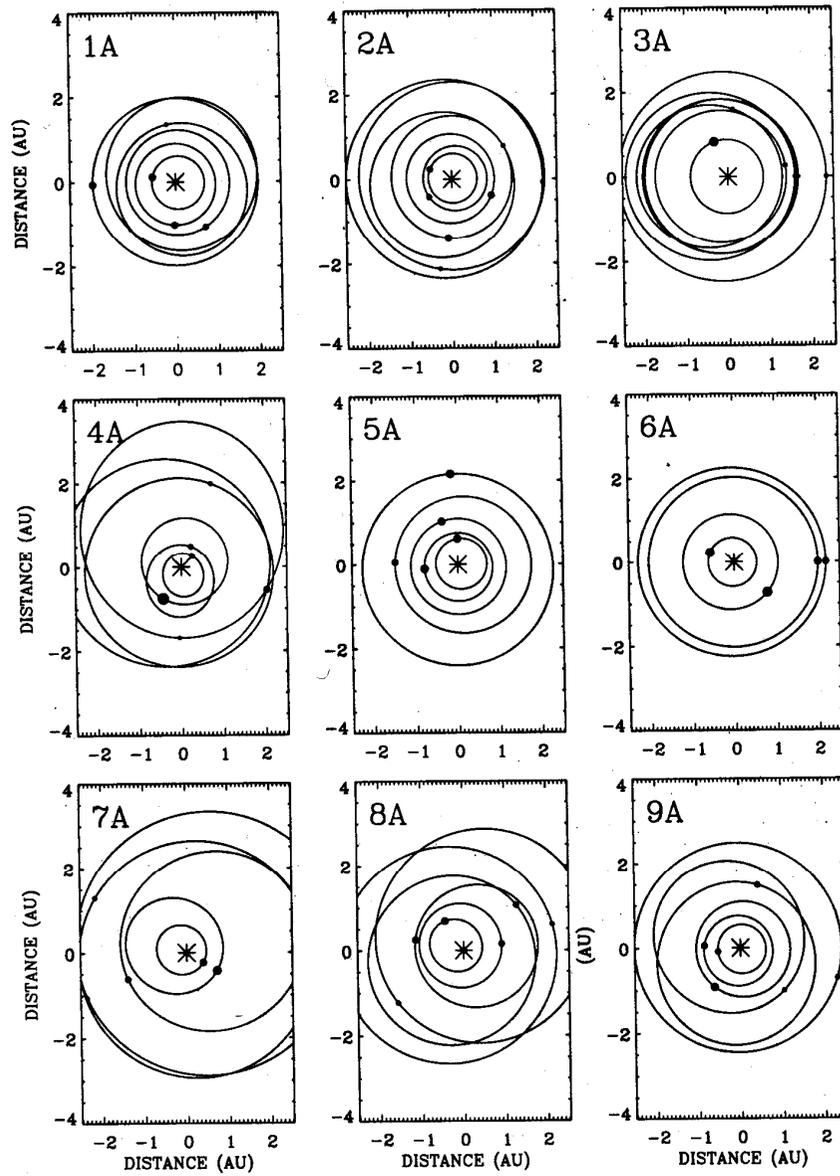
Temps typique de la phase finale :  $10^8$  ans

>> temps de dissipation de la nébuleuse

⇒ Environnement pauvre en gaz

⇒ génération de nombreux débris (disques de débris)

CHAMBERS AND WETHERILL



Des planètes trop excentriques

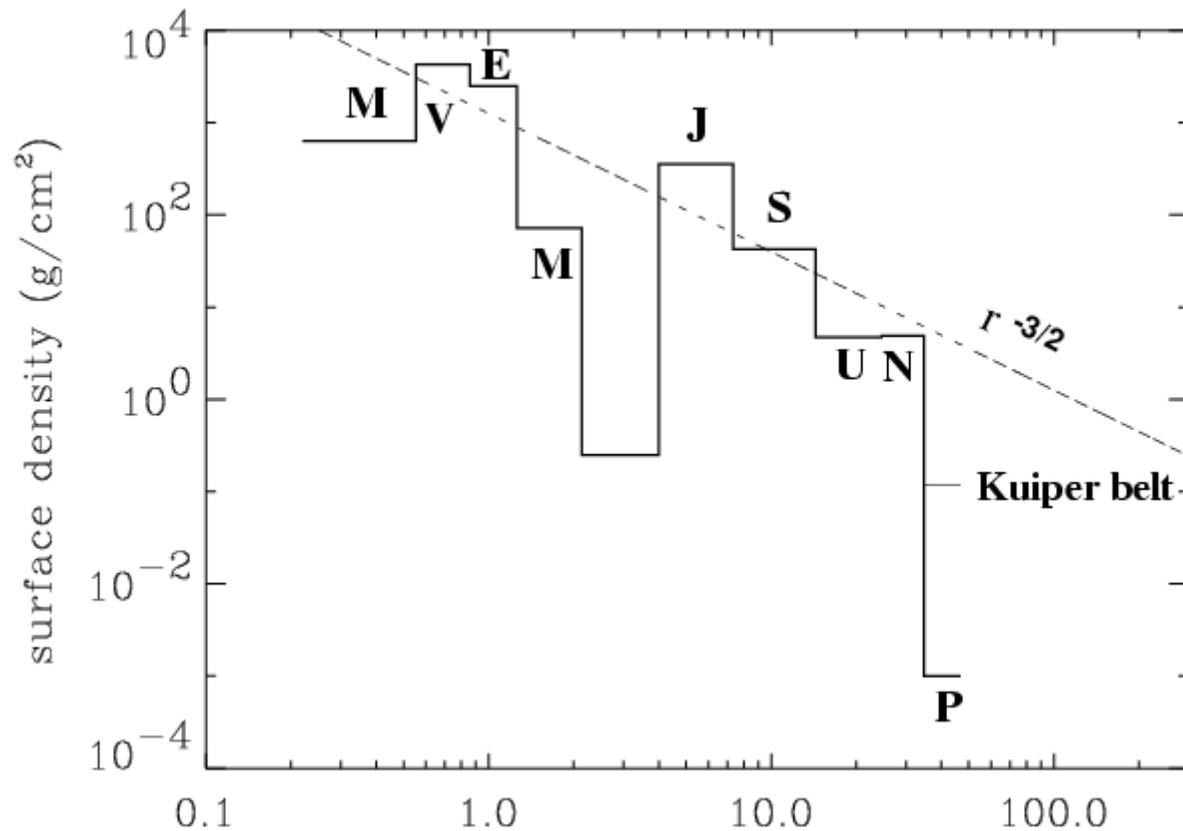
Importance de la friction dynamique ?  
(non prise en compte dans ces simulations)

Importance de la fragmentation ?

Mais de bien grands mystères demeurent ...

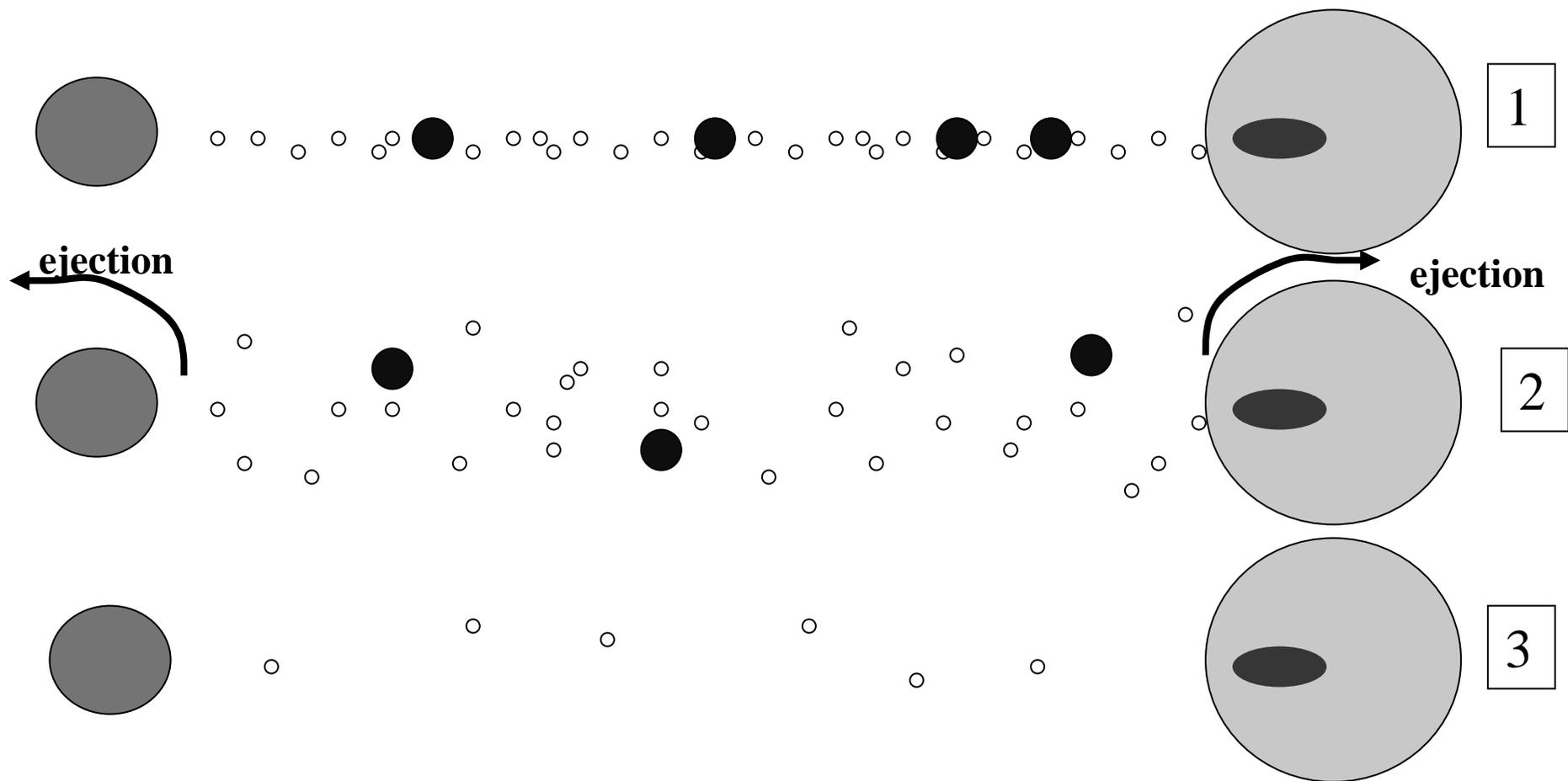
**Où est passé la masse du système solaire ?  
=> une question à tiroirs...**

Dans certaines régions 99% de la matière a disparue ...



# Pour la ceinture d'astéroïdes : une réponse

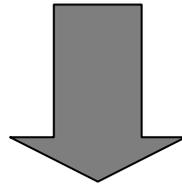
Des travaux récents suggèrent qu'il y avait des Protoplanètes entre Mars et Jupiter



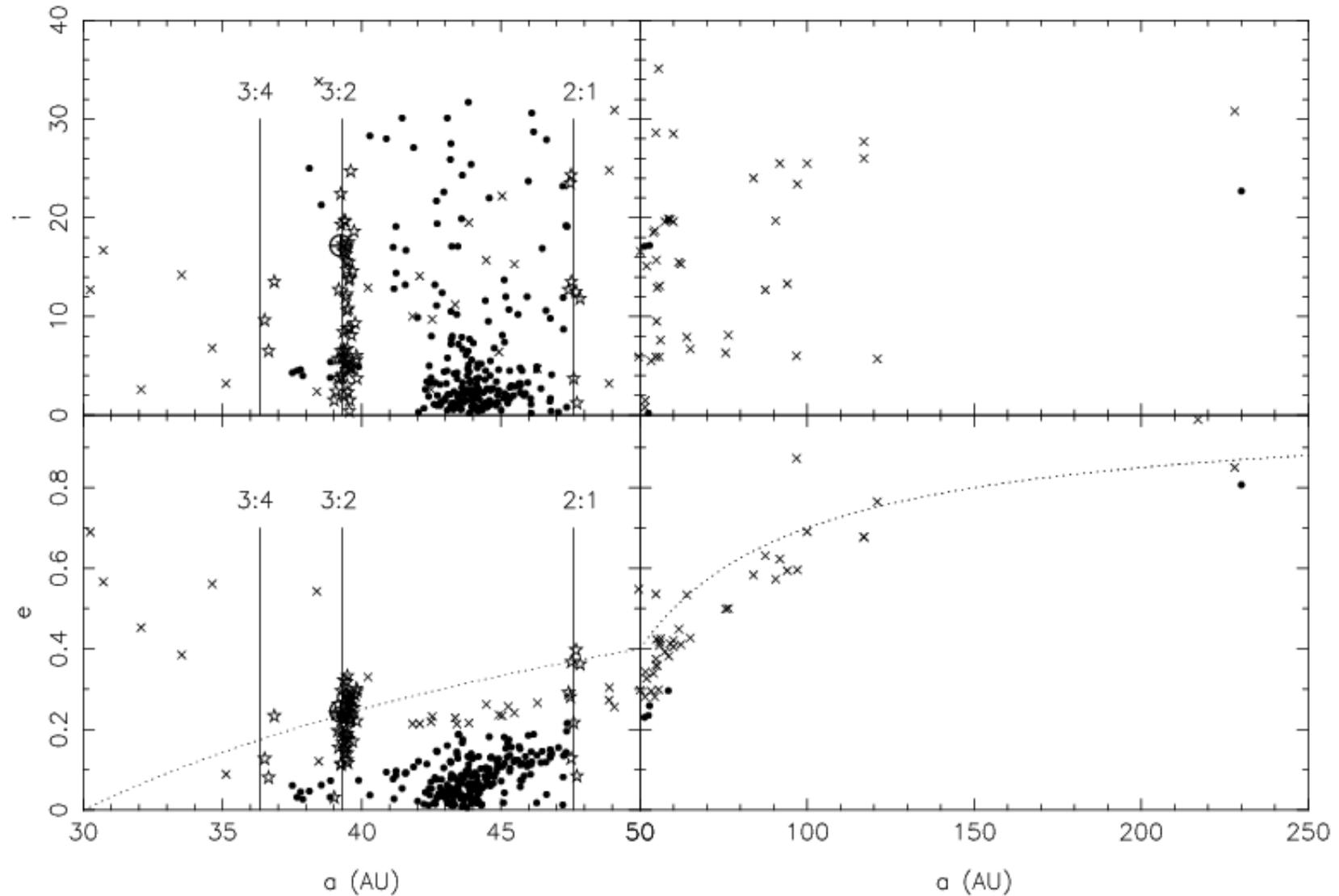
Mais cela ne marche pas pour la ceinture de Kuiper  
(les protoplanètes ne peuvent être éjectées....)

Masse de la ceinture aujourd'hui :  $\sim 0.1 M_t$

Masse de la ceinture initiale :  $\sim 10-30 M_t$  !!



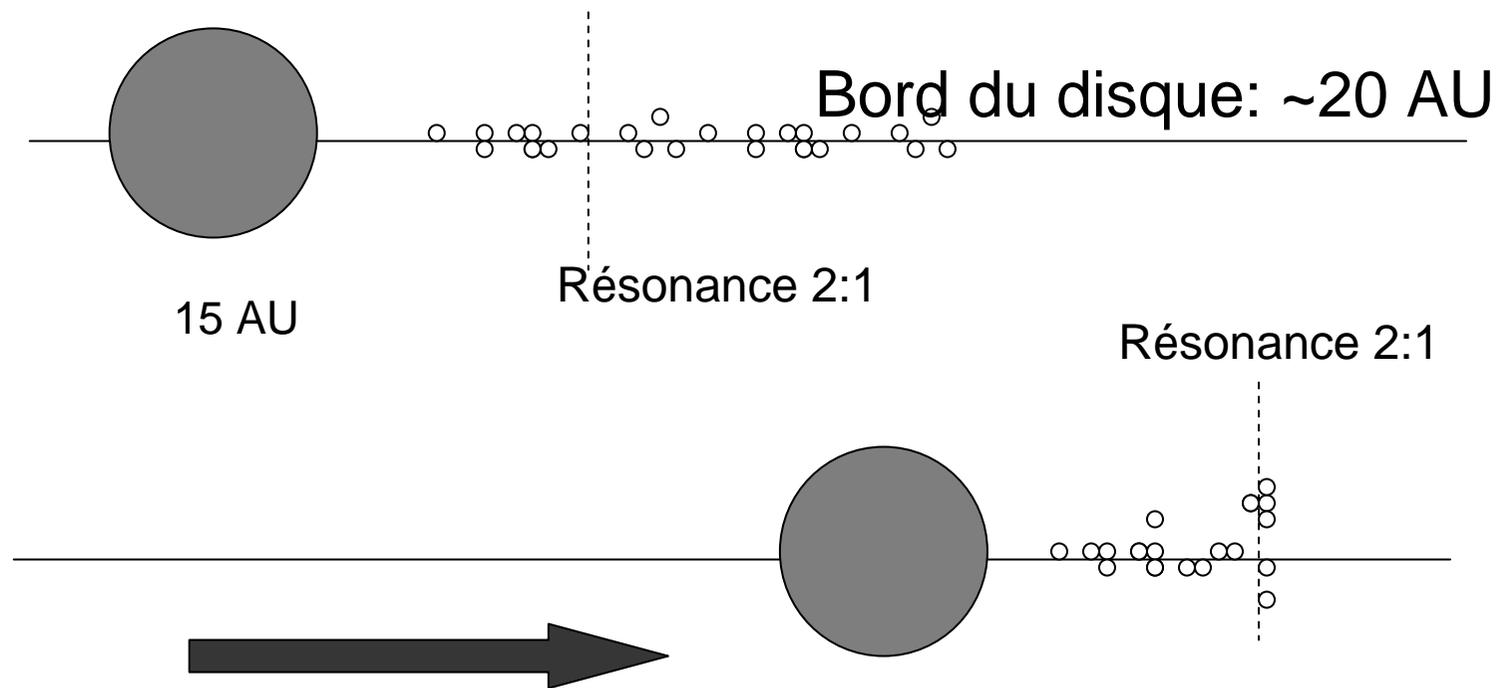
Nouvelles idées : migration des planètes géantes...  
passage d'une étoile proche



La ceinture de Kuiper est tronquée à  $\sim 48$  AU en résonance avec Neptune

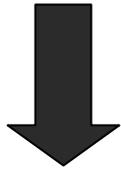
**Une explication :  
la ceinture de Kuiper n'existait pas au début**

**Elle a été transportée sur place par Neptune qui a migrée  
vers l'extérieur....**



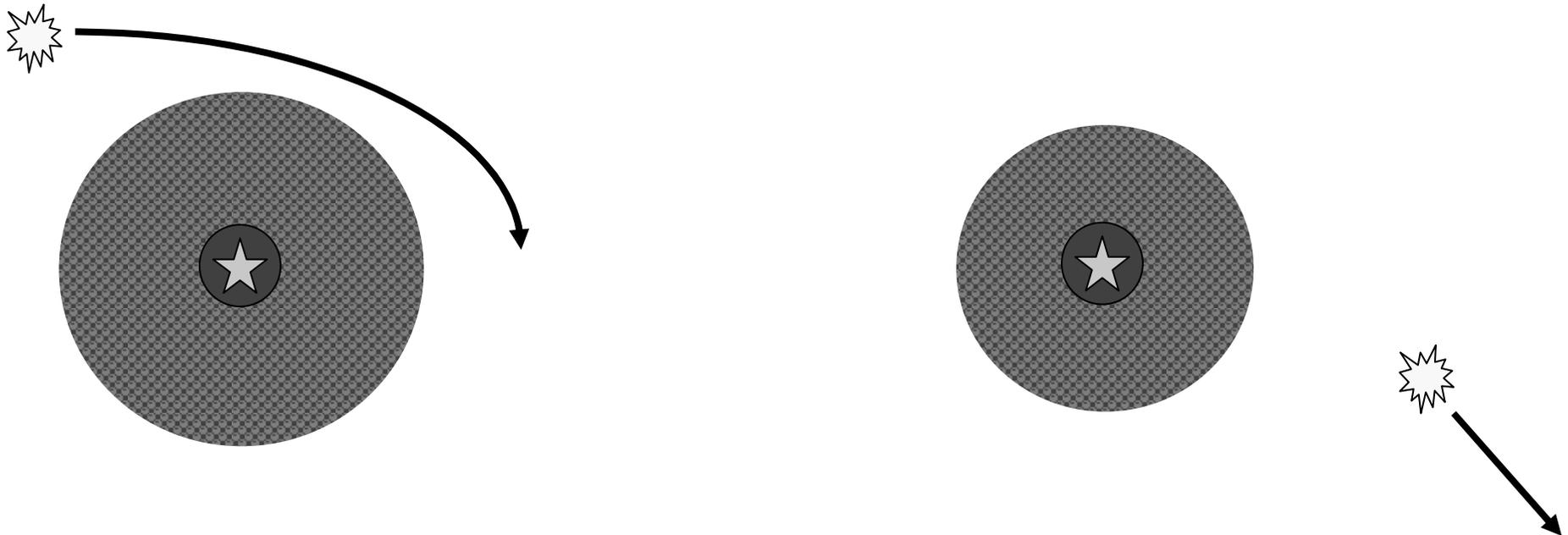
**Migration à 30 AU à par éjection de planétésimaux**

Alors pourquoi le disque était initialement tronqué à 20 AU ?

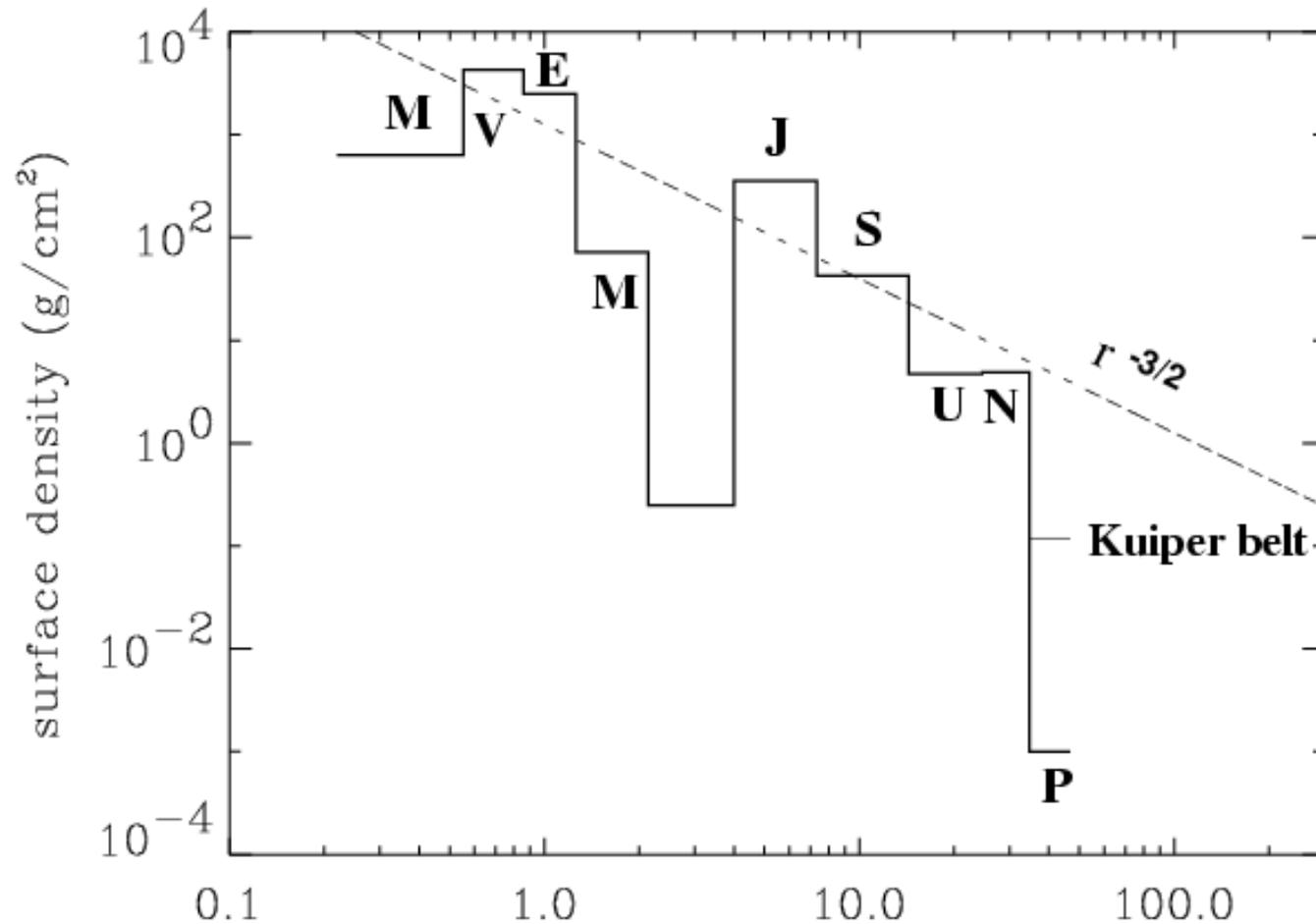


Solution possible : passage d'une étoile très proche (à moins de 200 AU) après la naissance du disque

Théoriquement possible car les étoiles se forment en groupe



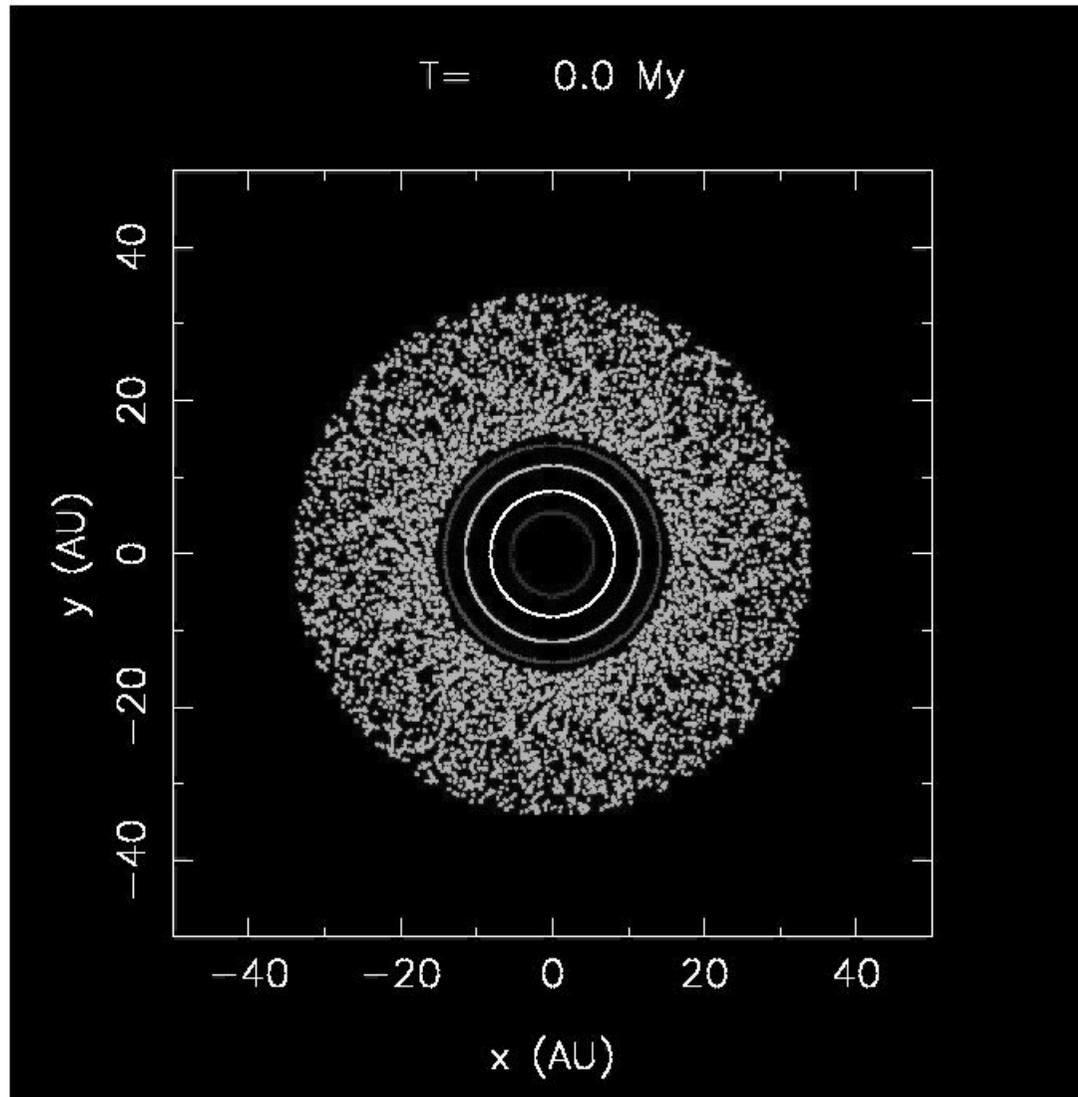
# A big mystery of the Kuiper Belt : The mass deficit



A popular scenario to explain the mass deficit is the Collisional Grinding of the KB over the age of the Solar System

We explore here some consequences of this scenario.

# « Nice Model » Late Heavy Bombardment at 800 My



Tsiganis et al. 2005

Saturn crosses  
Jupiter's 2:1 resonances

⇒ The S.S. is  
Destabilised

⇒ Intense bombardment  
of KB objects

⇒ Consistent with the formation of large bassins on the Moon

# ***En conclusion***

- **Modèle standard semble marcher**
- **On comprend bien la formation des planètes telluriques**
- **Points obscurs sur la formation des géantes gazeuses**
  - **Nouvelles planètes extra-solaires**

**Il existe sûrement d'autres Terres autour d'autres étoiles...**

**=> PROCESSUS D'ACCRETION VISIBLES AUTOUR DE SATURNE**

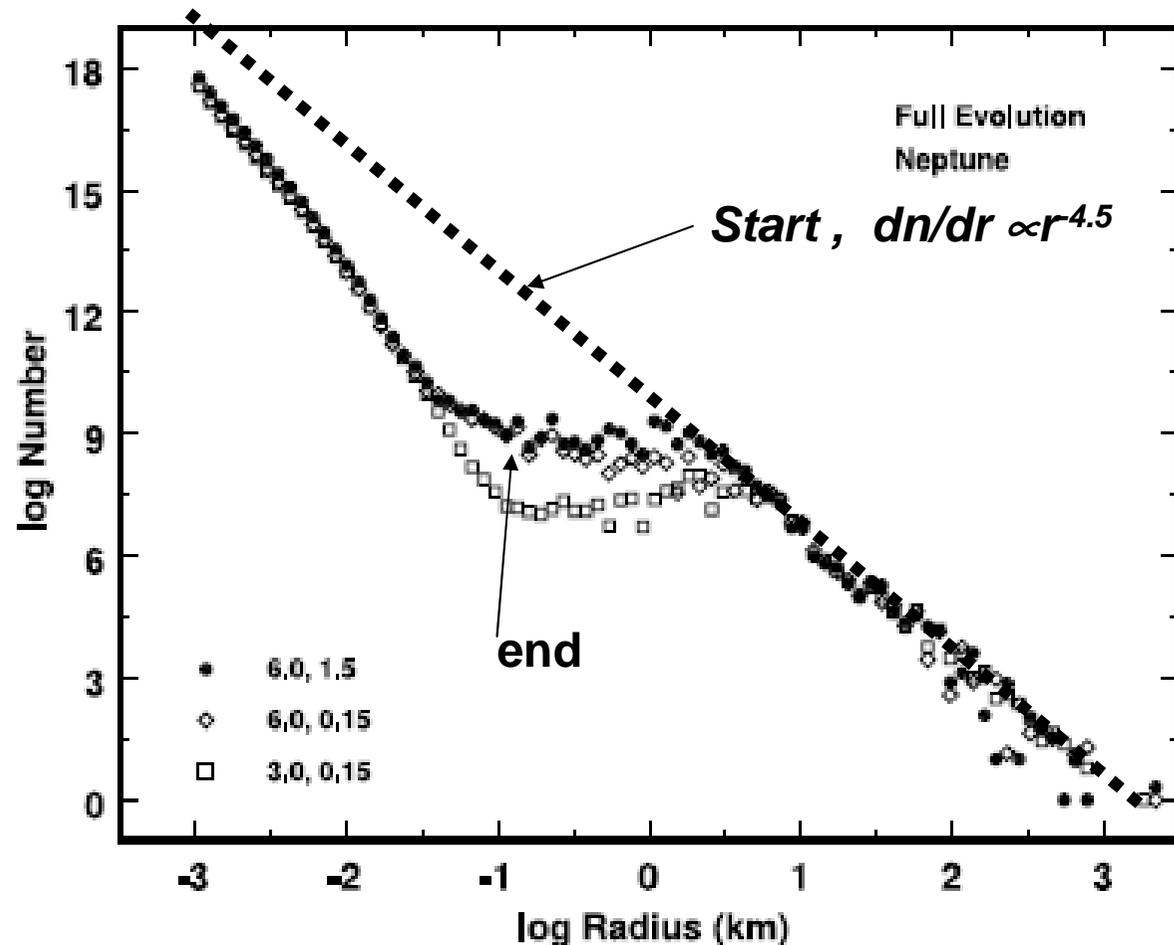
# Collisional Grinding Scenario

*Idea : The mass of the KB was contained in small Bodies that are easy to break*

## Initial Conditions :

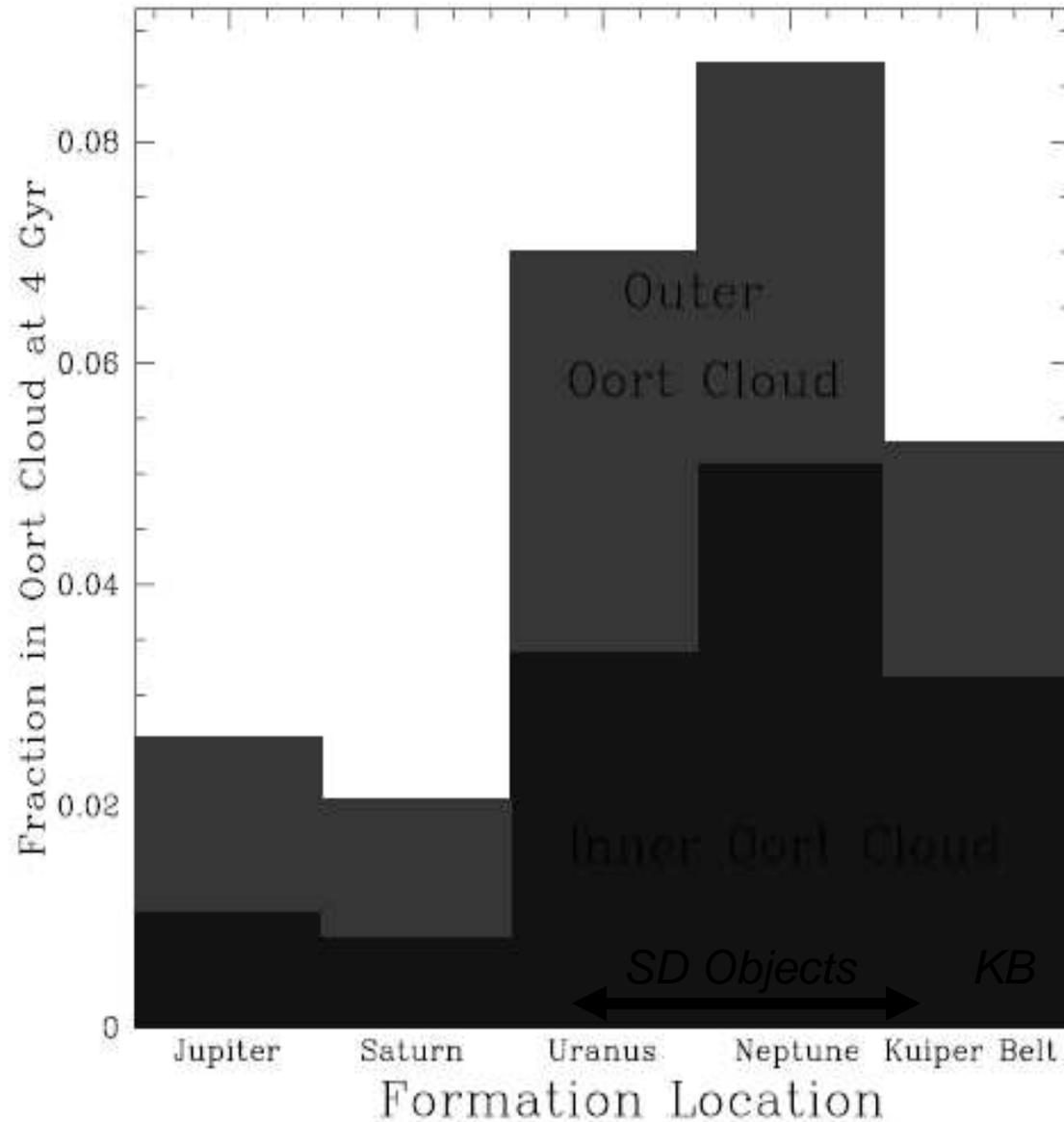
Steep size distribution  
+  
Only a few Plutos

Consequences :  
Strong erosion after  
 $4 \times 10^9$  years.



*From Kenyon & Bromley 2004*

# Broadening the problem by considering the Oort Cloud

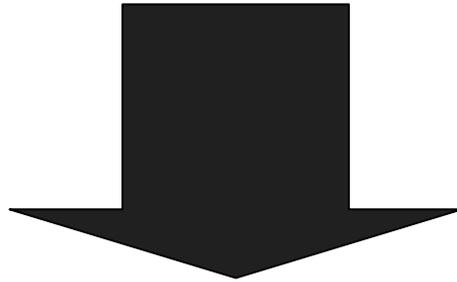


All 3 populations have their origin approximately in the same region

=> Similar Starting Size-distribution



The origin of both population  
cannot be studied separately



Implication of steep-size distributions for the evolution of :

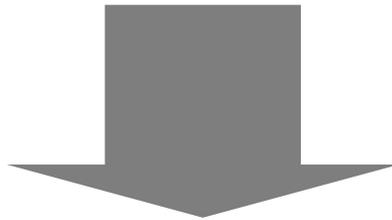
- Scattered Disk
- Oort Cloud

*IDEA: Test the collisional grinding scenario for bodies of*

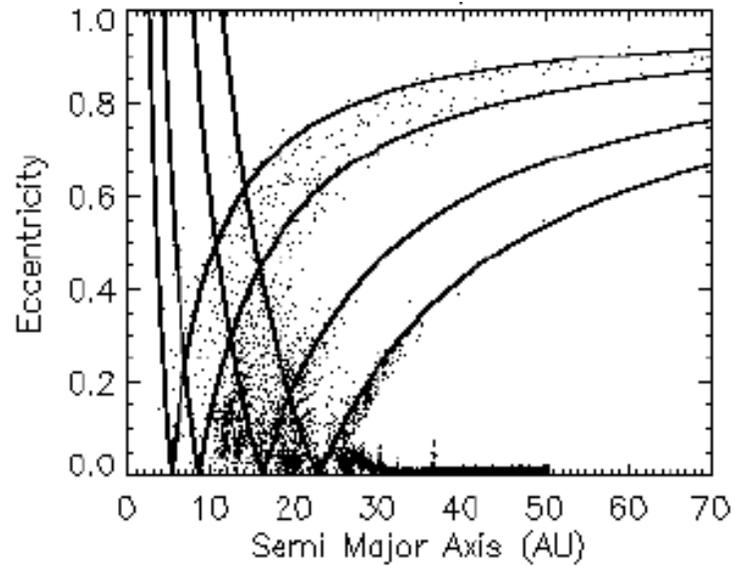
- *Kuiper Belt*
- *Oort Cloud*
- *Scattered Disk*

METHOD : Compute in a *single realistic* simulation of the dynamical AND collisional evolution of the 2 populations

DIFFICULTY : To couple properly both the *DYNAMICAL* & *COLLISIONAL* evolution of bodies: « *Particle in a box* » method cannot achieve this properly

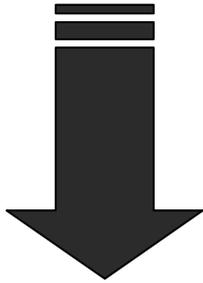


ALGORITHM : Use of a new hybrid approach (Charnoz & Morbidelli Icarus 2004) that was used to compute evolution of bodies ejected by Jupiter and Saturn.

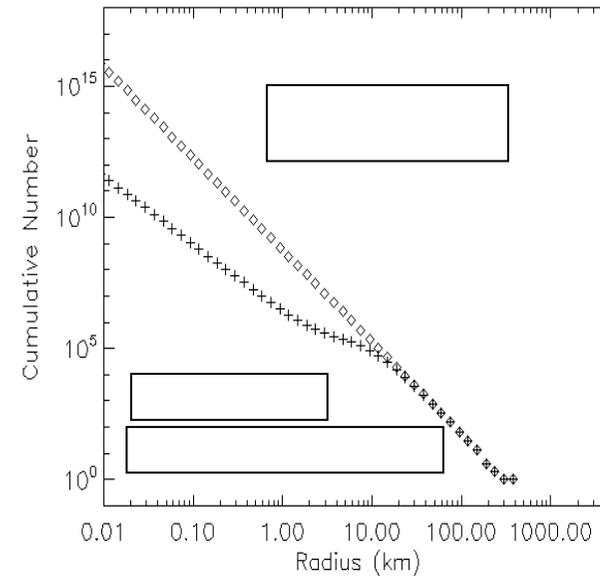
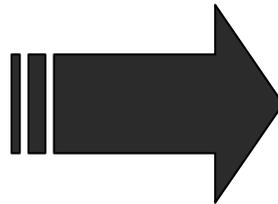


Dynamical code :  
Integration of 6000  
particles with J,S,U,N

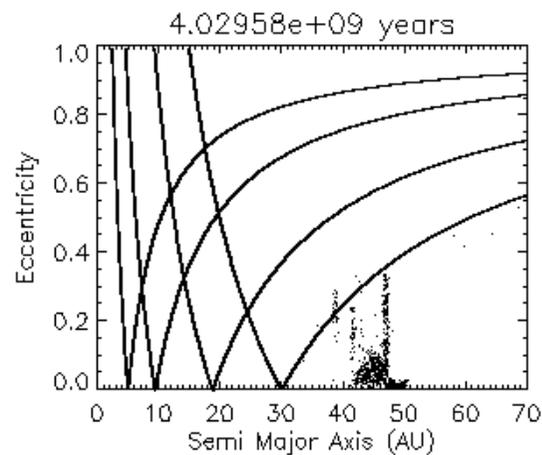
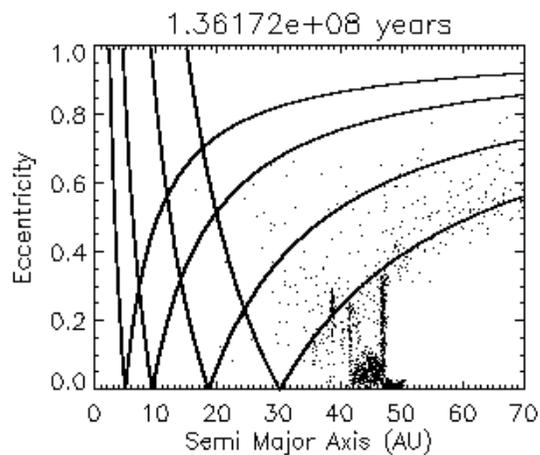
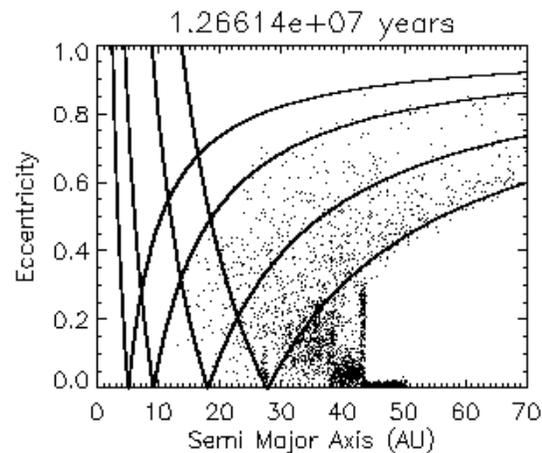
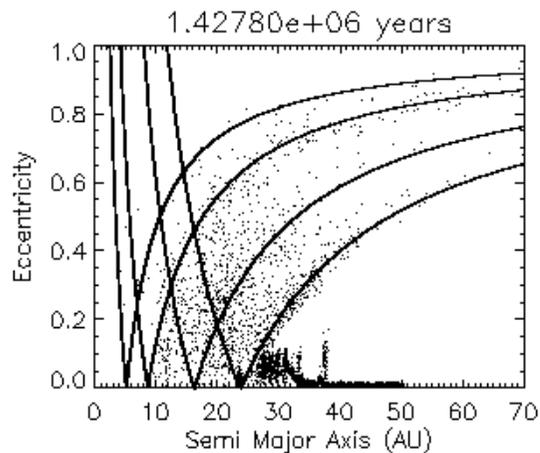
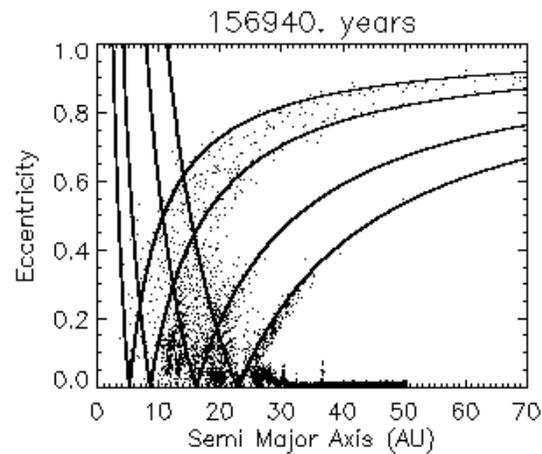
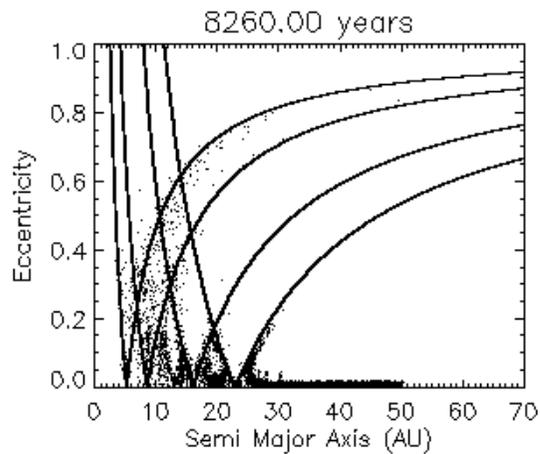
*A Hybrid Code*



Compute collision  
frequencies and velocities  
for all pairs of particles,  
with steps  $10^4$  years.



Each of 6000 particles holds  
a full size distribution  
evolved with a Fragmentation code :  
: Fragmentation + Craterisation

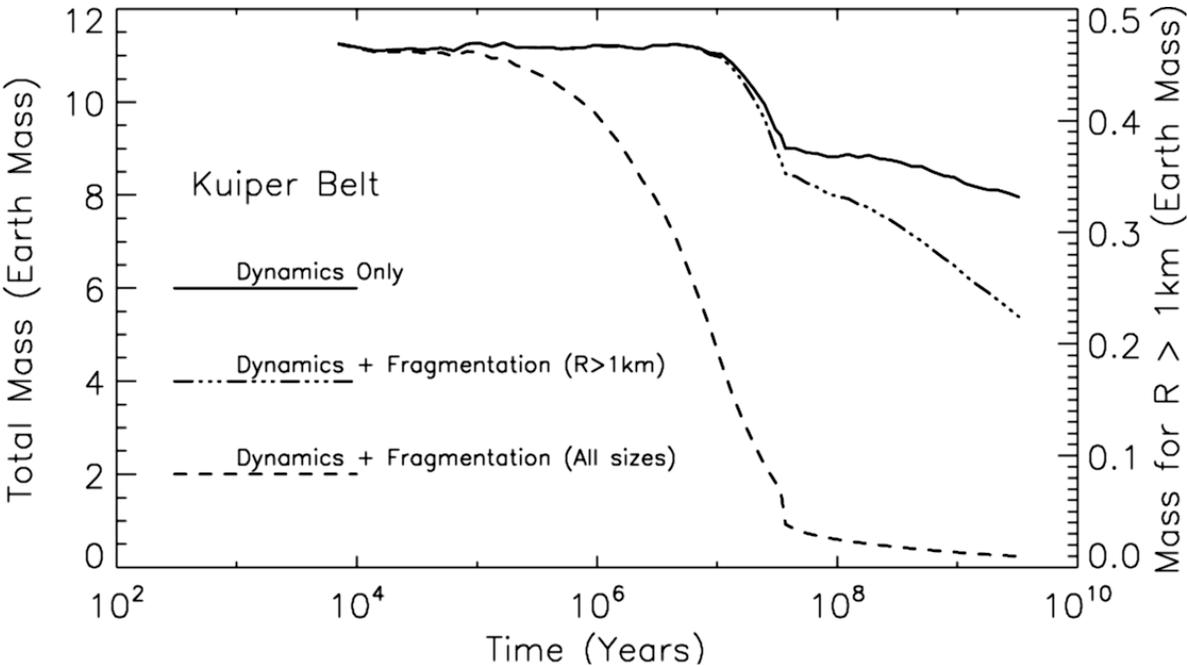
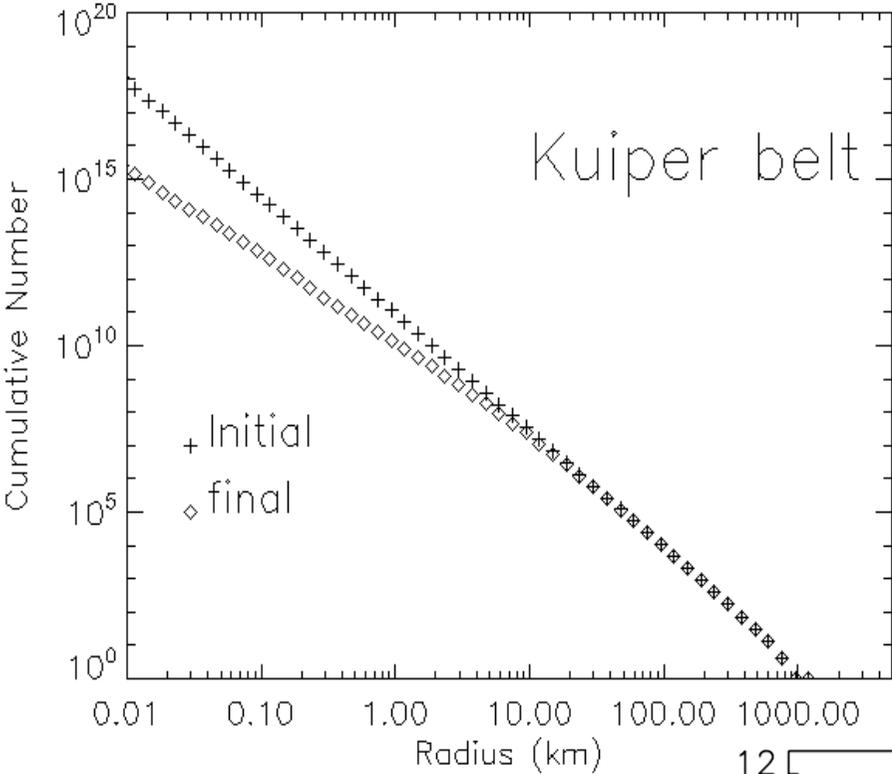


⇔ Compute the coupled evolution of 6000 size distributions at the same time

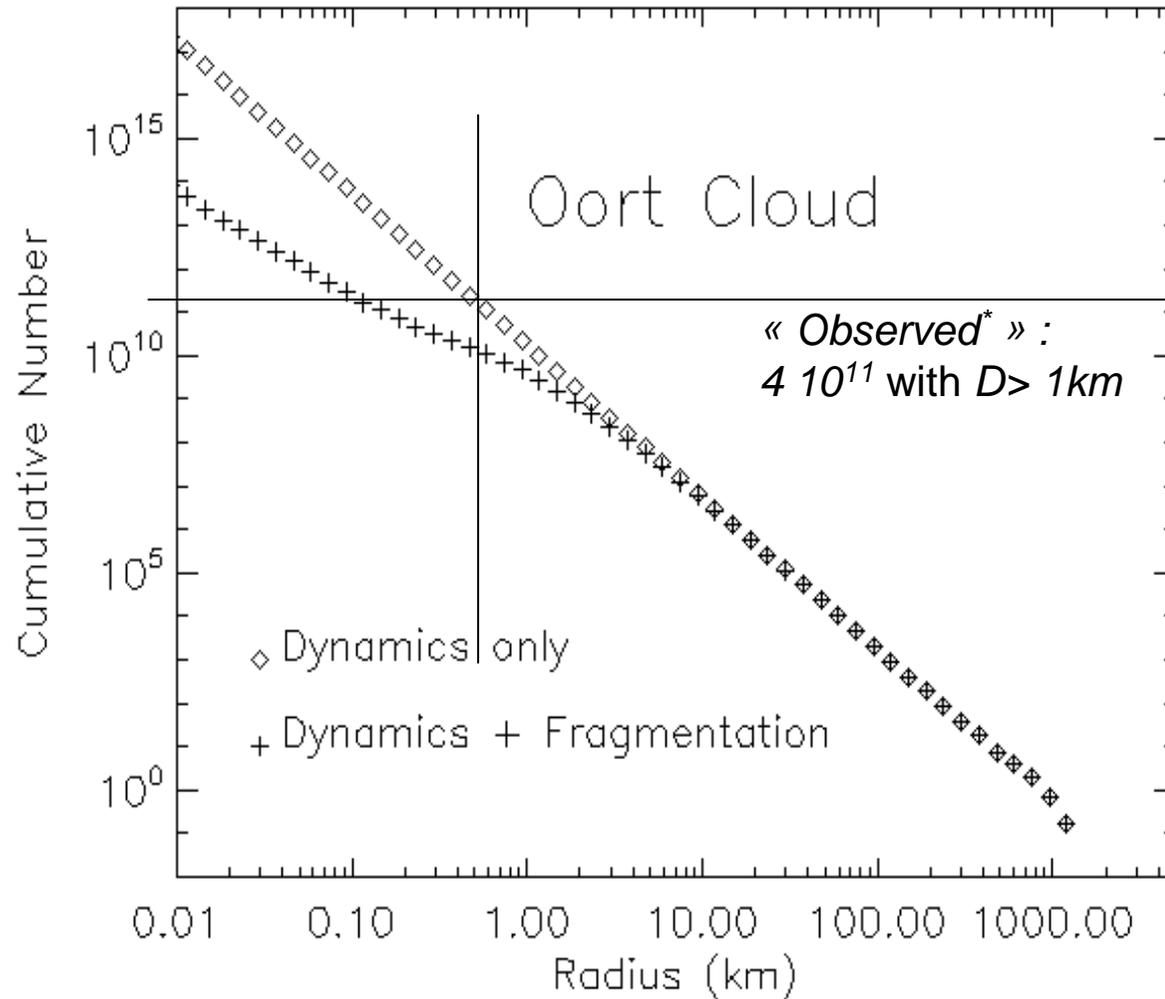
⇒ Very good description of the dynamics :

At the end of the Simulation  
 ~ 700 particles in the KB  
 ~ 10 particles in the SC  
 ~250 particles in the OC

# Evolution of the Kuiper Belt



Initial conditions :  
 mass in small bodies  
 ⇔  
 Collisional  
 grinding scenario



## Oort Cloud

~ 20 times less massive than expected

=> As argued in Stern & Weissman (2001)

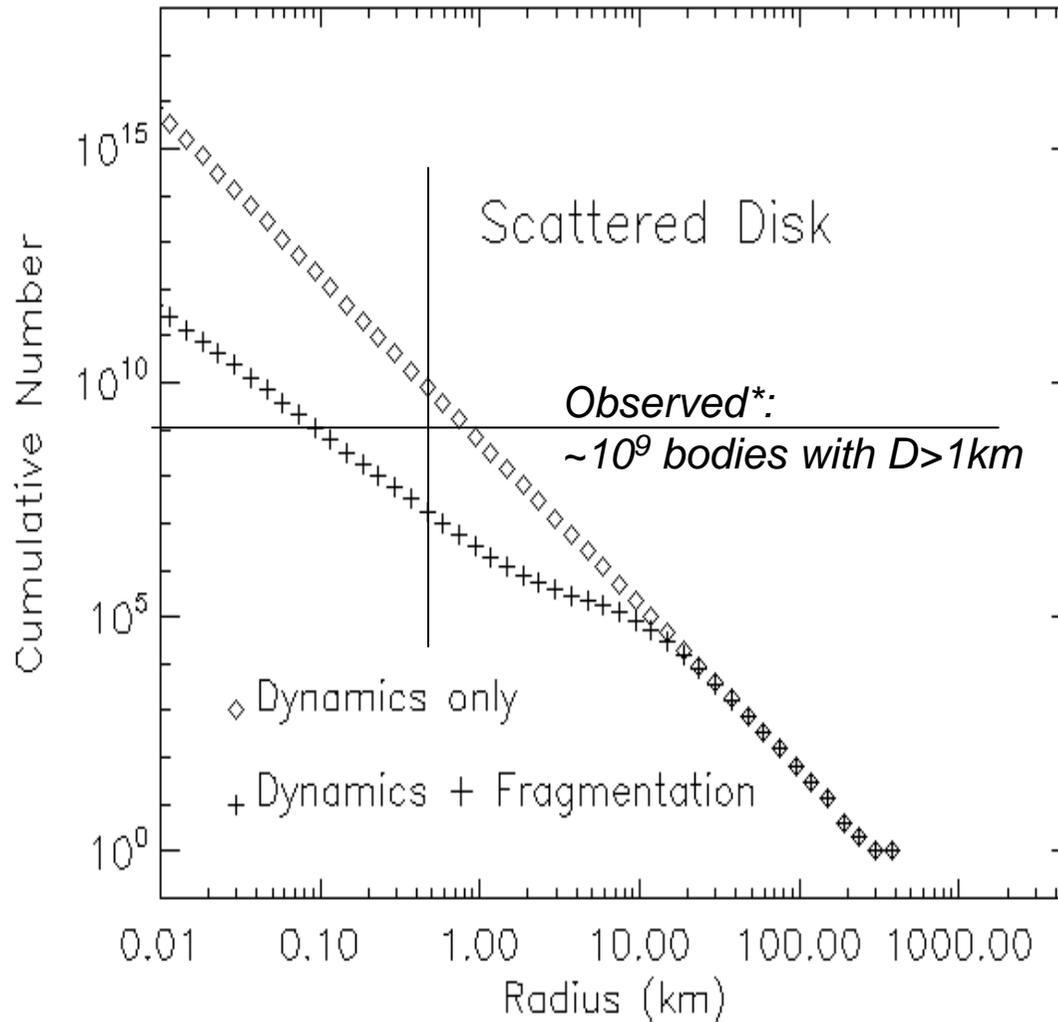
Initial conditions :  
mass in small bodies



Collisional  
grinding senario

*BUT big observational uncertainties exist for the Oort Cloud !!*

•From Flux of Long period comets  
*Francis et al. 2005*



## Scattered Disk

*A very severe evolution due to strong eccentricities/inclinations*

*\*From flux of Jupiter family comets*

Initial conditions :  
mass in small bodies



Collisional  
grinding senario

Only ~  $10^7$  bodies with  $D > 1\text{Km}$  survive in the Scattered Disk.

100 times less than Inferred from the observation  
of Jupiter Family comets  
(Duncan & Levison. 1997 )

# CONCLUSIONS

-Using a new and hybrid approach to couple collisional and dynamical evolution, we show that :

1- In every scenario, the most severely depleted population is the  
**SCATTERED DISK**

2- The collisional grinding of the KB has severe problems :

- The Oort Cloud is too severely depleted by a factor of  $\sim 20$
- The scattered disk is too severely depleted by a factor of 100

☞ *Charnoz & Morbidelli 2006, submitted to ICARUS ...*

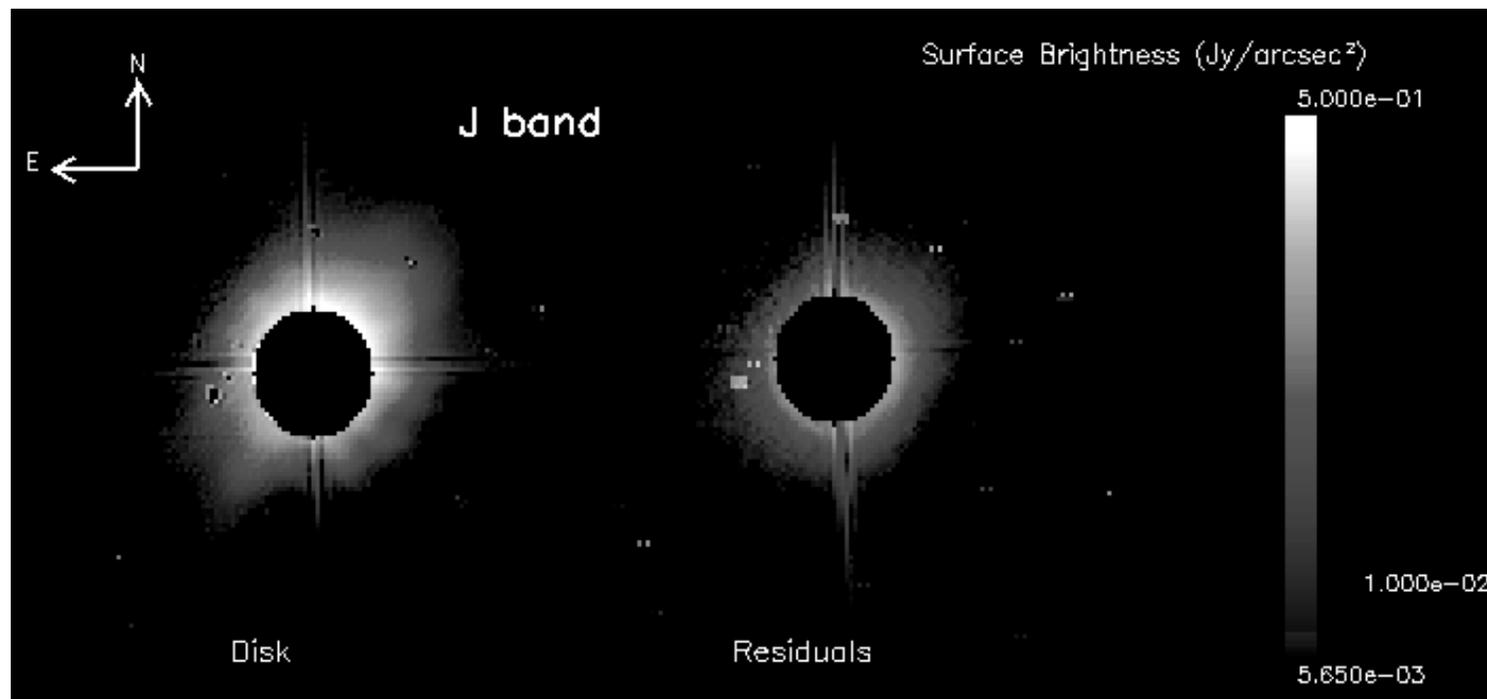
3- Dynamical depletion, *not collisional erosion*, should be responsible for the mass deficit of the KB

=> The starting Size Distribution is the current one scaled up by a factor of 100-1000.

=> Resulting SC & OC are consistent with observations.

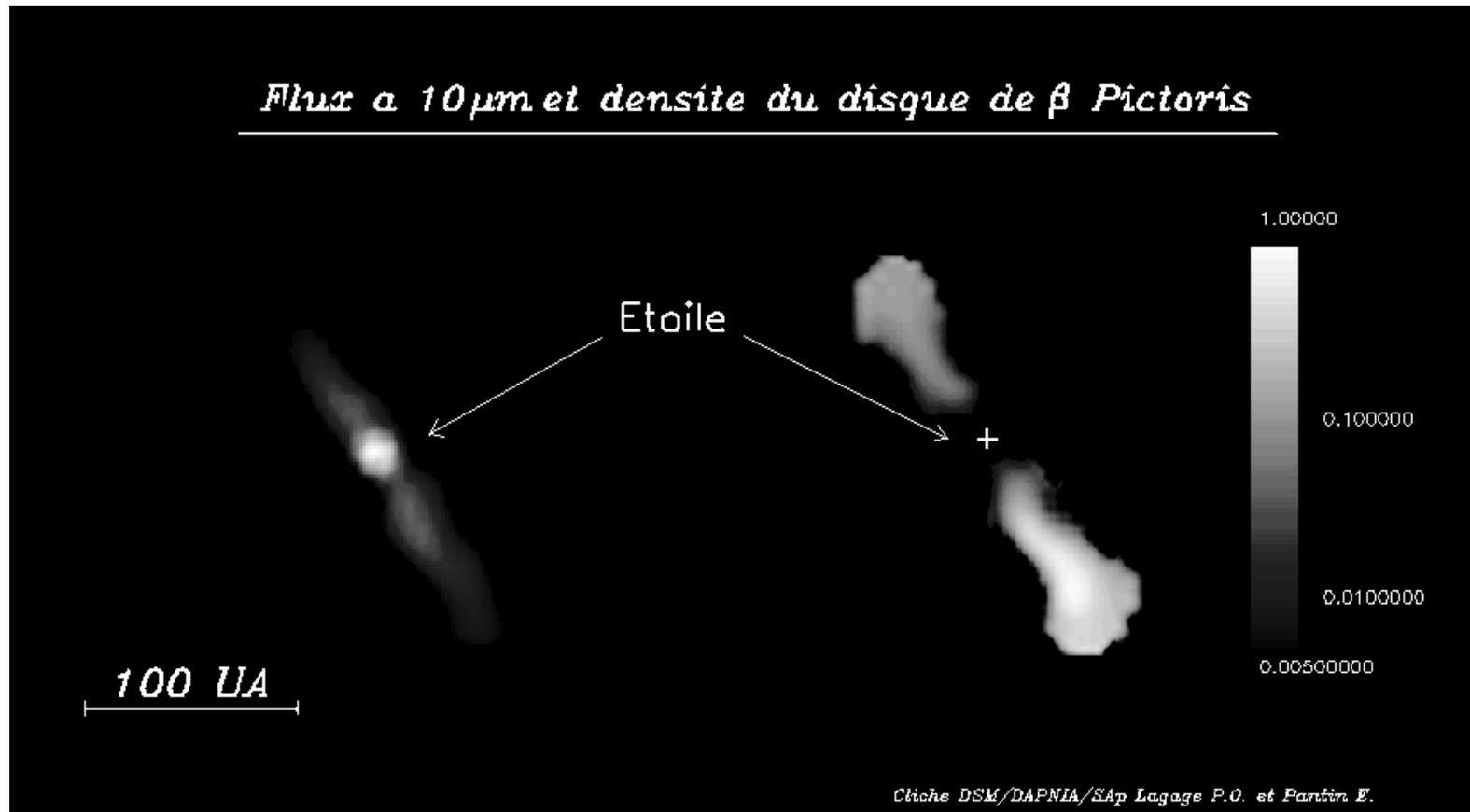
# Disques post-planétaires

**HD 100546 (~100 parsecs)  
pré seq. princ. ;  $\sim 10^7$  ans , Disque :  $i \sim 50^\circ$**



# Beta-Pictoris (~19 parsecs)

□ : A5, ~10<sup>8</sup> ans, ZAMS Disque :  $i \sim 0^\circ$ . Trou central REEL



## **4. Les autres Systèmes Solaires**

**A l'heure actuelle :**

**Pas d'observation *directe* de planètes autour d'autres étoiles**

**1994 : Incertitude totale sur l'existence d'autres Systèmes-Solaire.**

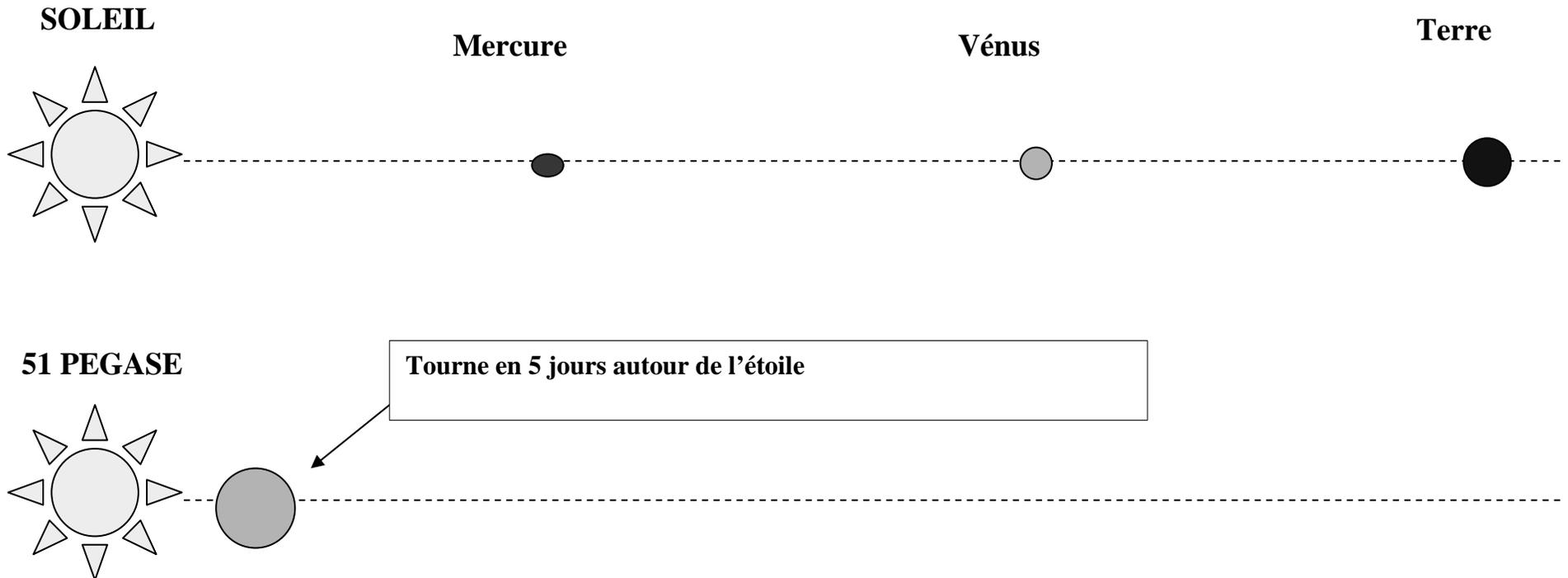
**1995, 6 Octobre :**

**Première détection indirecte : Une planète autour de 51 Pégase**

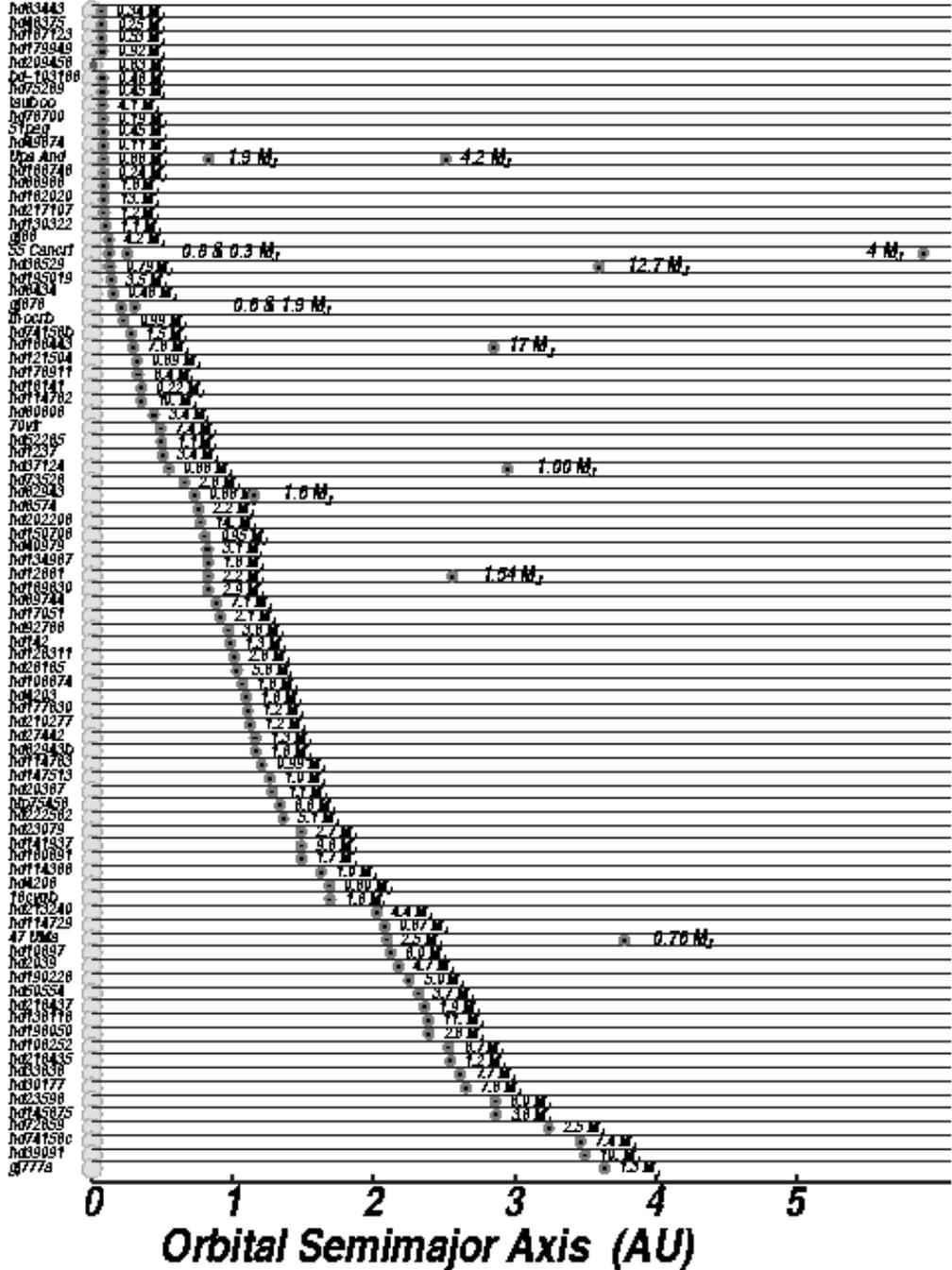
**.... GRANDE SURPRISE !!**

# Très différent de notre Système-Solaire !

**51 Pégase :**  
**Une planète grande comme JUPITER**  
**Qui est très proche de son Soleil**



# De nombreuses planètes Découvertes de manière indirecte

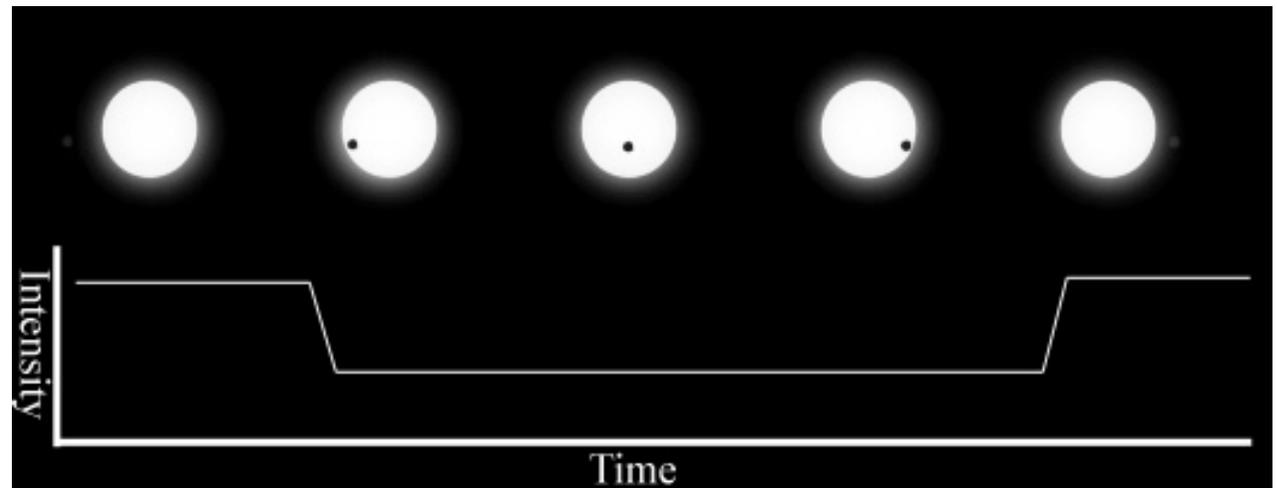
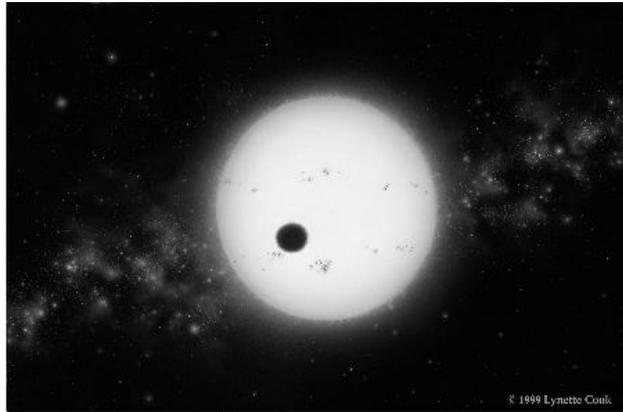


Novembre 1999 :  
Détection d'un transit

# Premier transit en 1999

**HD 209458 – (150 a.l.)**

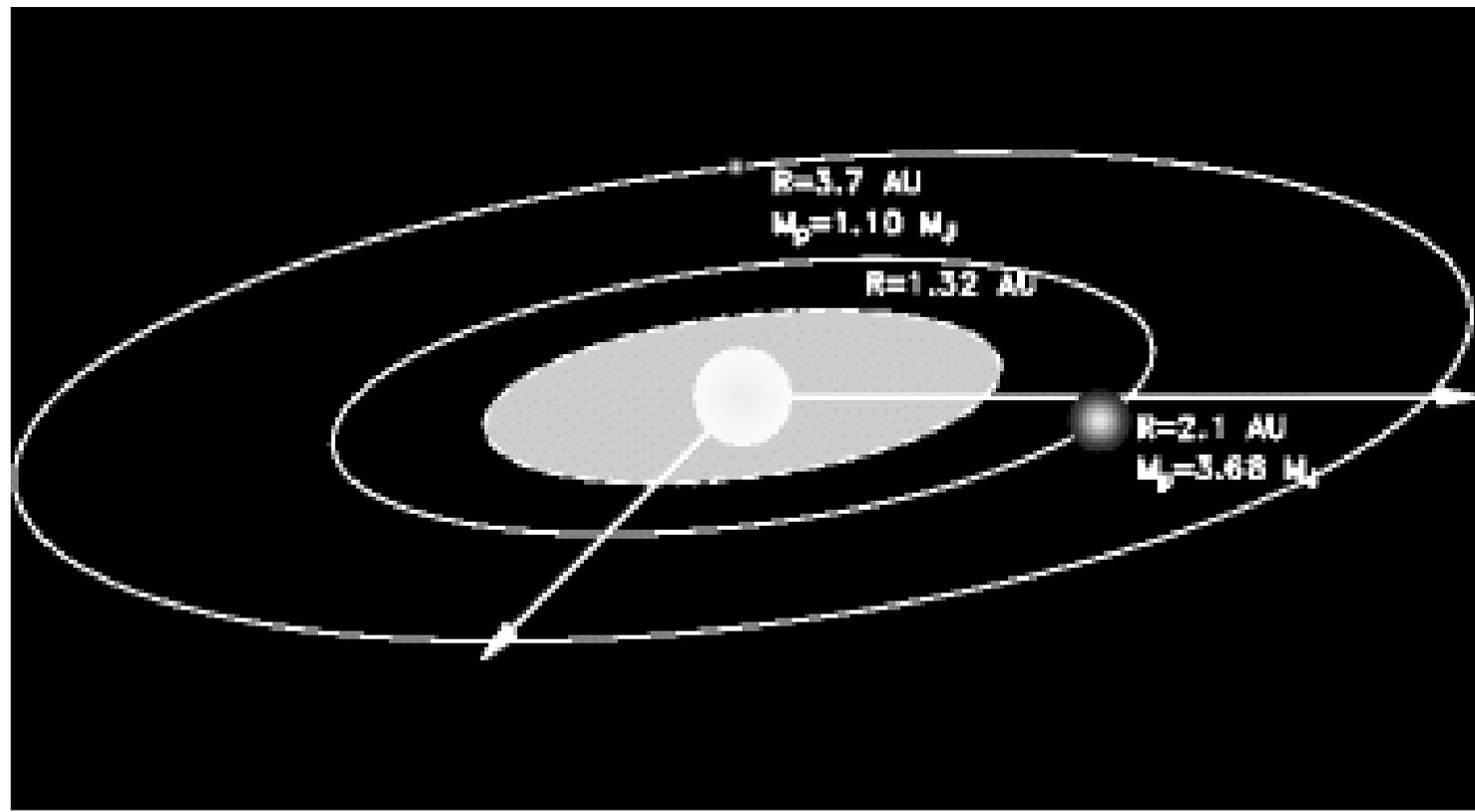
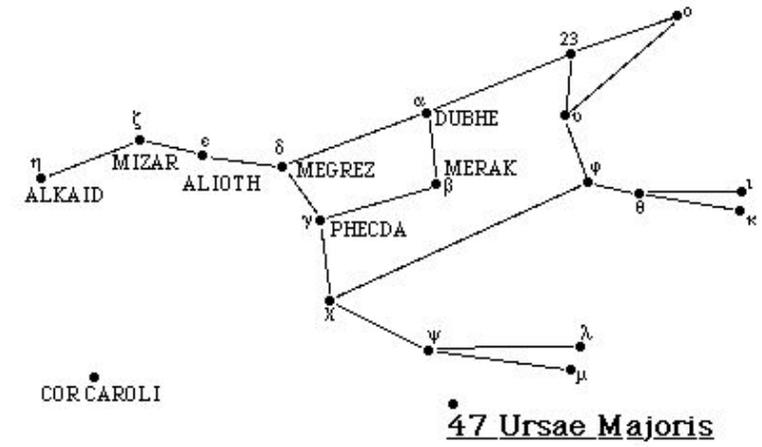
**Vue d'artiste**



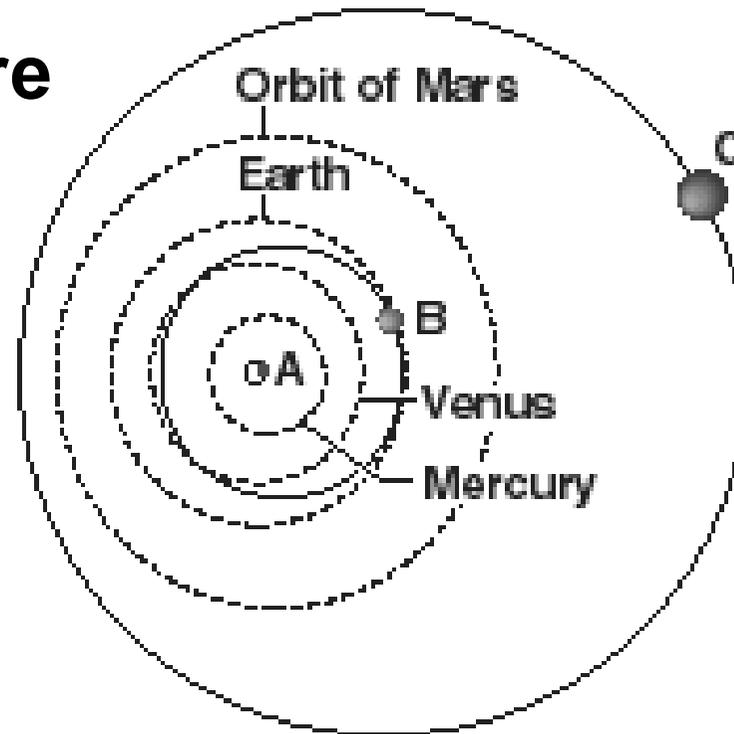
# PREMIER SYSTEME PLANETAIRE

« PLAT » EN 2001: 47 UMA

Ursa Major, the Great Bear  
(The Big Dipper)

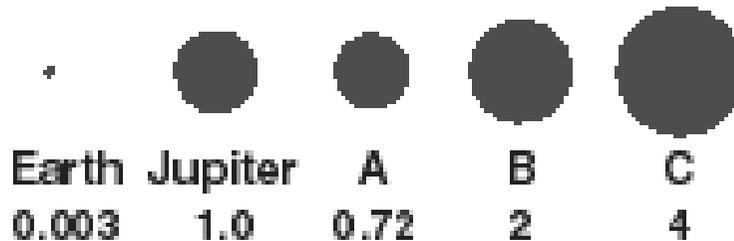


# Un système planétaire Autour de Upsilon Andromède



## • HOW THEY COMPARE

Minimum size, in Jupiter masses

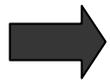


# **Comment une planète de type Jupiter Peut elle être si proche de son étoile ?**

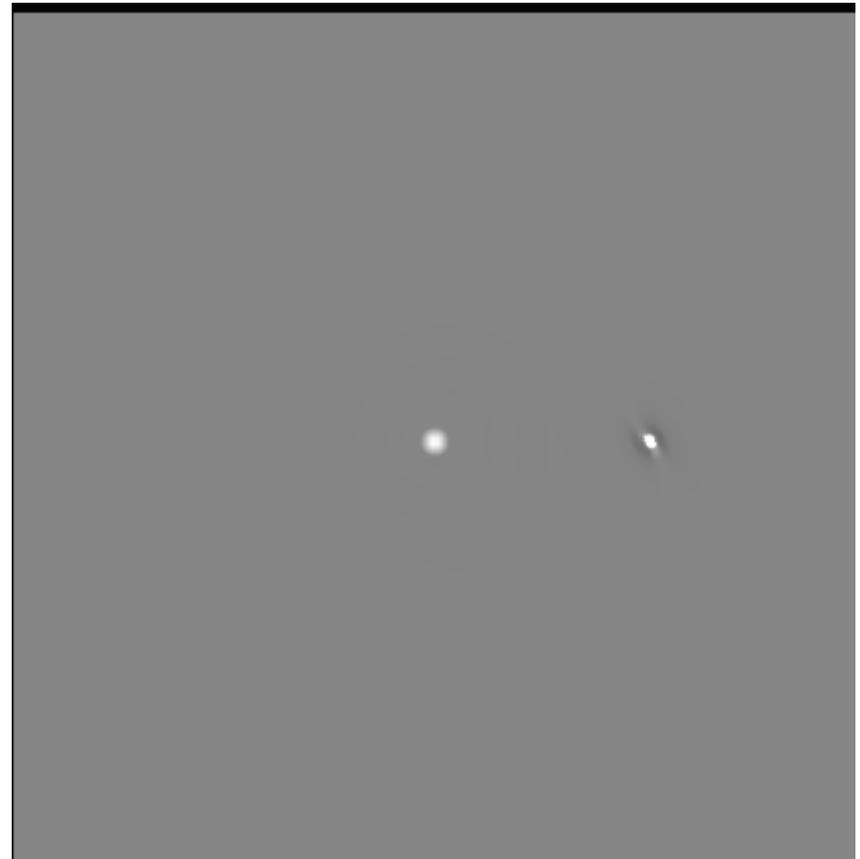
**Nouvelles hypothèses :**

**1. Migration dans la nébuleuse de gaz**  
**Simulation numérique**

**2. Formation sur place :**  
**Dans ce cas :**  
**« Jupiter Chaud » ~ petite étoile**



**Q'EST-CE QU'UNE PLANETE ?**

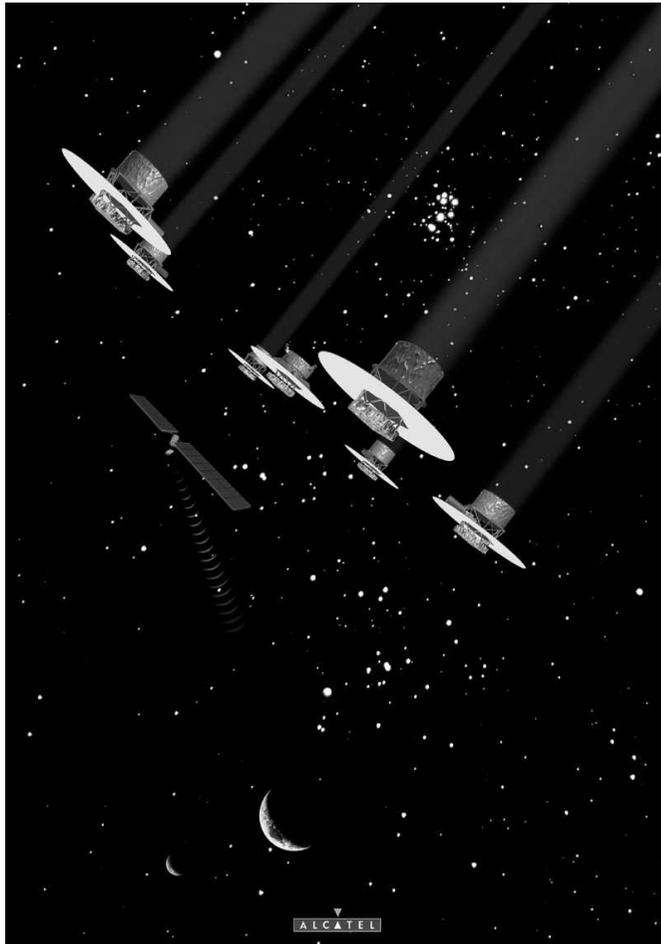


## ***En conclusion***

- **Modèle standard semble marcher**
- **On comprend bien la formation des planètes telluriques**
- **Points obscurs sur la formation des géantes gazeuses**
  - **Nouvelles planètes extra-solaires**
  - **Géantes et « collées » à leur étoile**
    - **Migration possible**

**Il existe sûrement d'autres Terres autour d'autres étoiles...**

**Attendons ~ 15 ans encore pour les voir**



DARWIN



COROT

**Et 2000 ans pour y aller ...**

