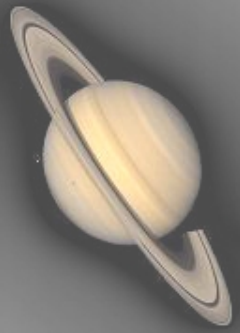


FORMATION PLANÉTAIRE







Aurélien CRIDA

Contraintes physiques :

- 3 types de matériaux : gaz, roches métaux, glaces
- Le Système Solaire est plan
- Soleil, planètes tournent dans sens direct
- Orbites pratiquement circulaires (sauf Mercure)
- Planètes tournent sur elles même dans sens direct (sauf Vénus, Uranus)
- La plupart des satellites tournent dans sens direct

Idée (Buffon) :

Le Soleil tournait tellement vite qu'il a éjecté des morceaux, qui sont devenus les planètes.

Idée (Kant, Laplace) :

Disque autour du Soleil, qui donne naissance aux planètes en se condensant.





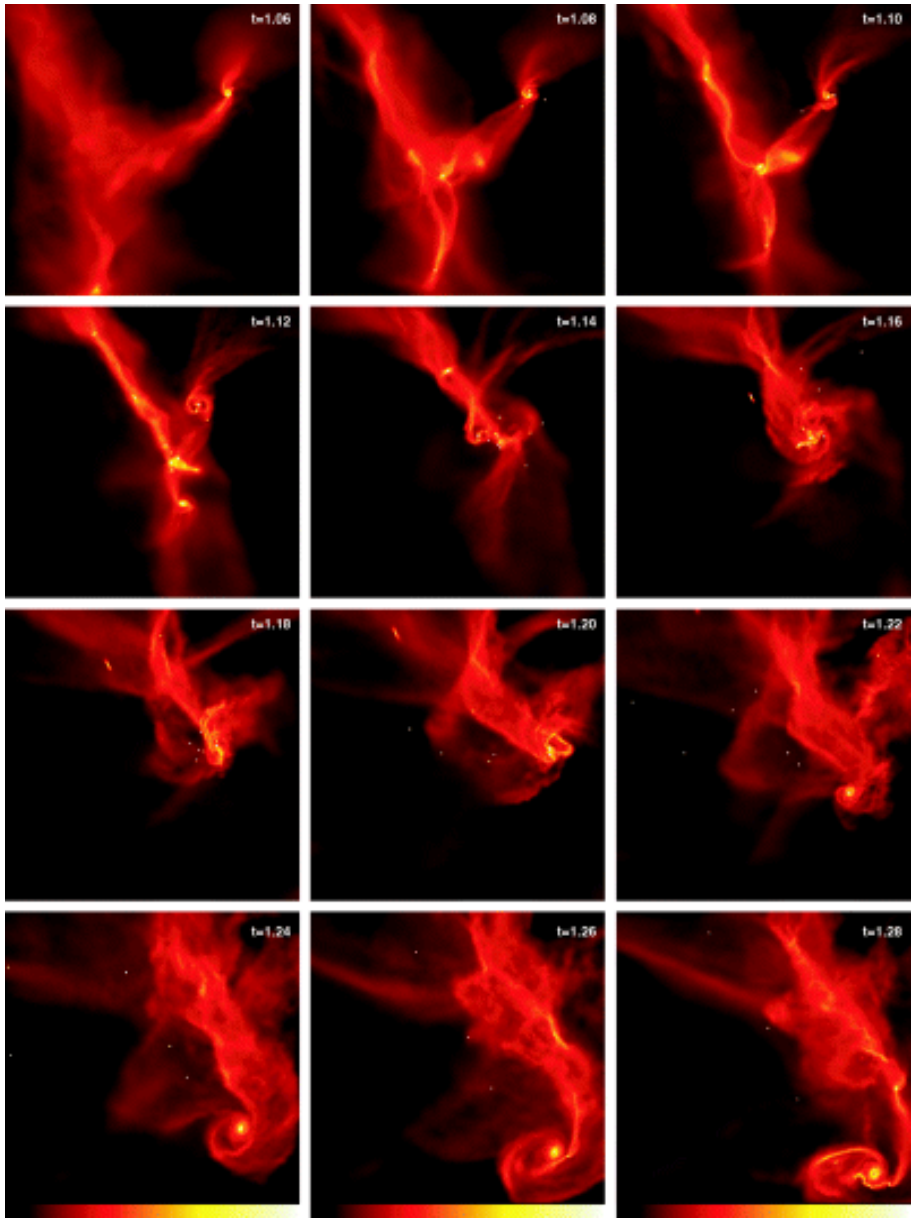
Théorie

Une étoile se forme par effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz interstellaire.

Au centre: pression et température augmentent : l'étoile s'allume.

Autour, si le nuage avait déjà un moment cinétique, l'effondrement n'est pas arrêté dans la direction de l'axe de rotation, mais il est freiné par la force centrifuge dans le plan perpendiculaire : formation d'un disque en rotation autour de l'étoile centrale.

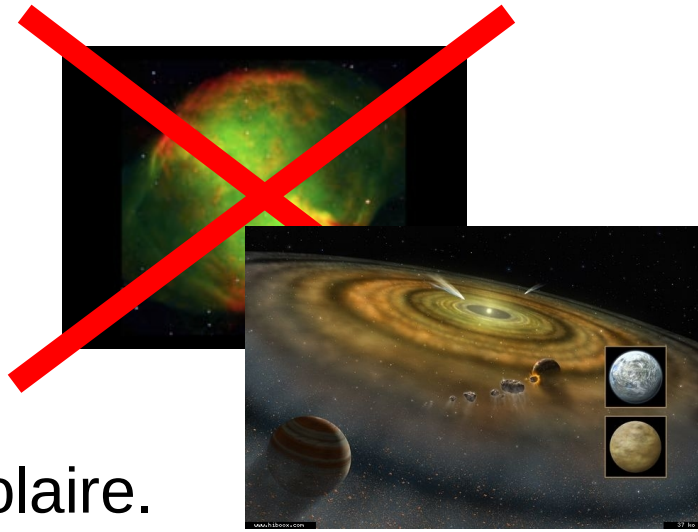
Simulation numérique



La Nébuleuse Solaire de Masse Minimale

Minimum Mass Solar Nebula ...
Nébuleuse Solaire de Masse Minimale ...

Qu’est-ce que c'est que ça ?



Comme son nom l'indique (pas),
ce n'est pas une nébuleuse,
mais un disque protoplanétaire.

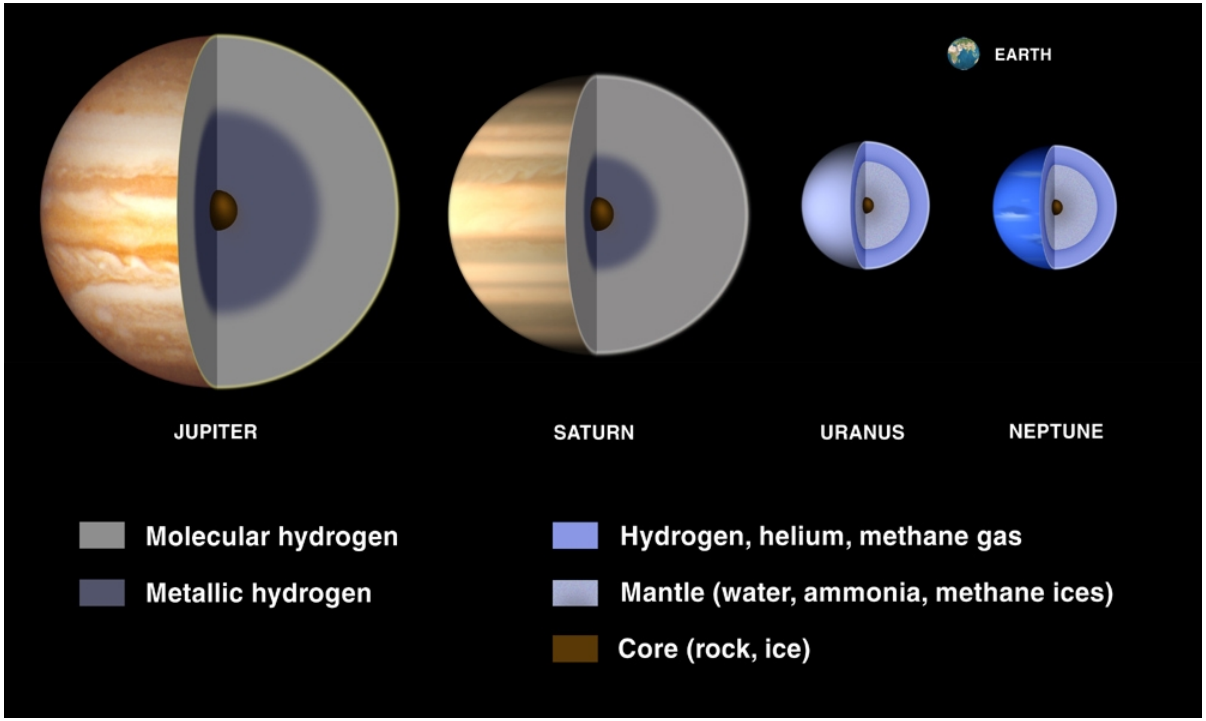
Solaire : d'où est issu de le système solaire.

De Masse Minimale : contient juste ce qu'il faut de matière pour former les huit planètes.

La Nébuleuse Solaire de Masse Minimale

Combien faut-il de solides ?

Les planètes géantes ont un coeur de ~10-15 masses terrestres.



Quels solides ?

Composition chondritique.

La Nébuleuse Solaire de Masse Minimale

Recette pour une Nébuleuse Solaire de Masse Minimale

Ingredients pour 8 planètes :

~ 60 masses terrestres de solides (de composition chondritique).
~ 0.01 masse solaire de la fameuse mixture H (75%), He (25%).

Préparation :

Répartissez les solides au fond du plat :

~0.05 $M_\oplus$ autour de 0.4 AU [0.3 : 0.5]
~0.8 $M_\oplus$ autour de 0.6 AU [0.5 : 0.8]
~1 $M_\oplus$ autour de 1 AU [0.8 : 1.3]
~0.1 $M_\oplus$ autour de 1.6 AU [1.3 : 2]

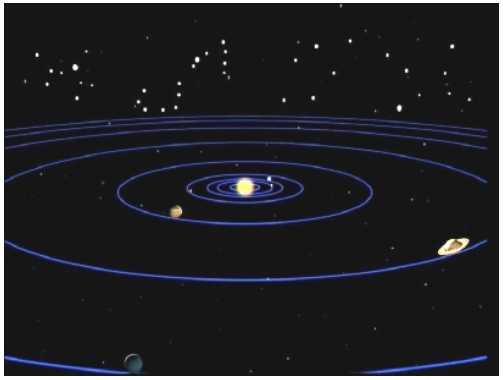
~15 $M_\oplus$ autour de 5.2 AU [2 : 7.5]
~10 $M_\oplus$ autour de 9,6 AU [7.5 : 15]
~15 $M_\oplus$ autour de 19.2 AU [15 : 25]
~15 $M_\oplus$ autour de 30 AU [25 : 35]

Multipliez la densité obtenue par 100 (ajout de gaz).

Couvrez le tout avec un profil en loi de puissance.

Disposez autour du Soleil pendant 10 millions d'années.

Vous obtenez le système solaire. Bon appétit !



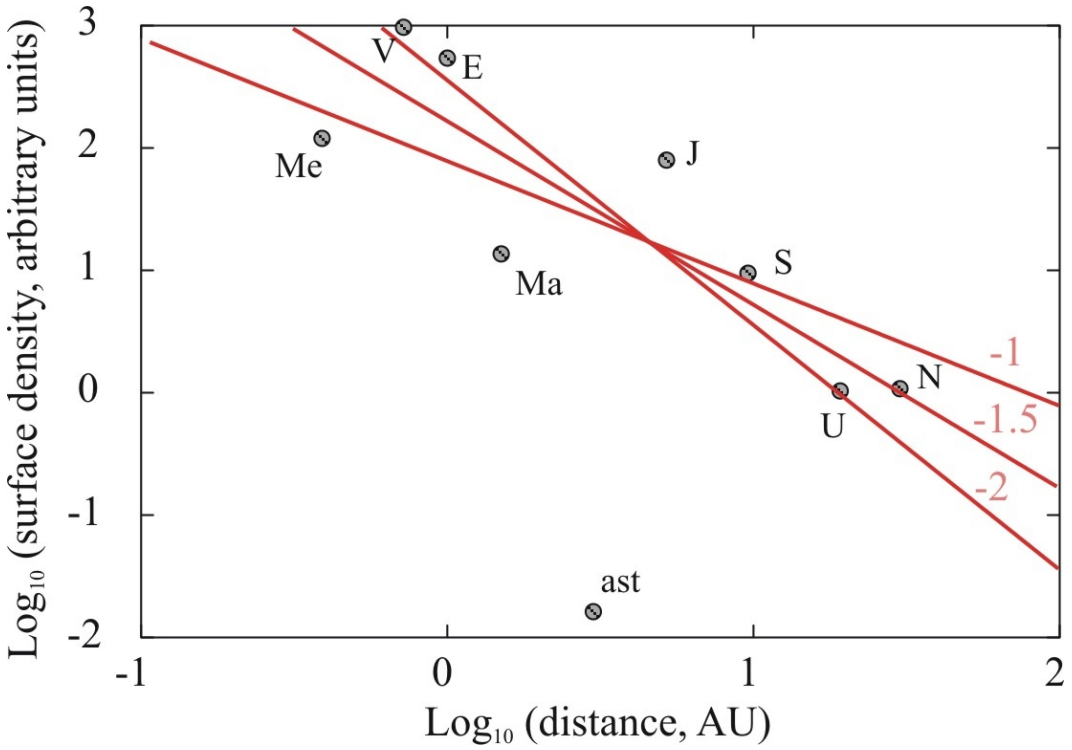
La Nébuleuse Solaire de Masse Minimale

Hayashi (1981) :

$$\Sigma\ (r) = 1700 \left(\frac{r}{1\,UA}\right)^{-1,5}$$

$$g.cm^{-2}$$

et Weidenschilling (1977).



<u>Importance de la MMSN :</u>

C'est le disque étalon, LA seule référence avant qu'on puisse en observer.

Densité utilisée pour la friction dynamique sur les premiers solides, la coagulation, la migration, etc.

La Nébuleuse Solaire de Masse Minimale

Hayashi (1981) : $\Sigma\ (r) = 1700 \left(\frac{r}{1\ UA}\right)^{-1,5}$ g.cm^{-2}

et Weidenschilling (1977).

Principales hypothèses :

- Les planètes ont accrété **tous** les solides (d'où «minimale»).

- Les planètes se sont formées **localement** :
là où elles orbitent actuellement, à partir du matériel qui était là.

- La MMSN n'évolue pas : densité constante.

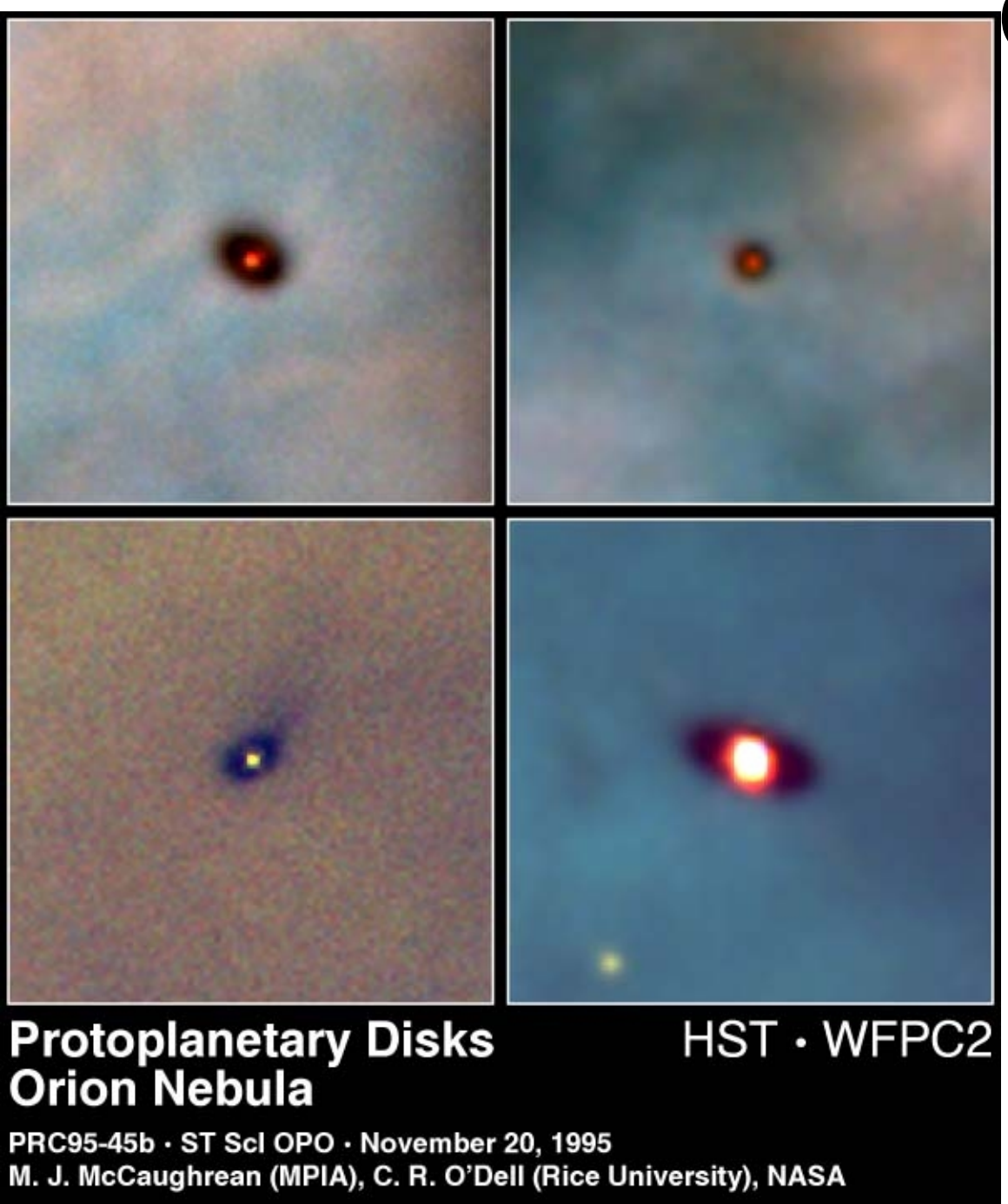
Ces hypothèses sont-elles raisonnables ?

Observations (0)

L'étoile rayonne à ~6000 K, dans le visible.
Le gaz du disque rayonne à 10 à 1000K, dans l'IR.

Certaines étoiles semble émettre trop d'IR quand on prend leur spectre. On en conclut qu'elles sont entourées d'un disque de gaz. Mais peut-on le voir ?

Observations (1)



Observations (2)

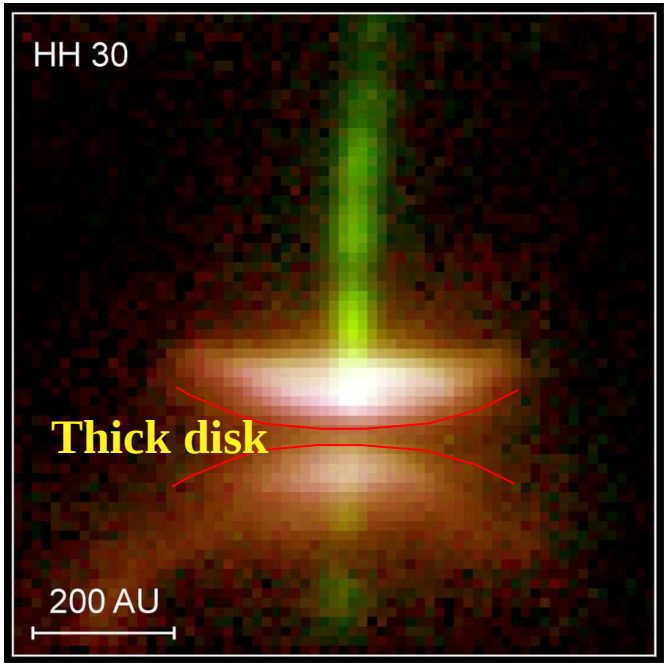
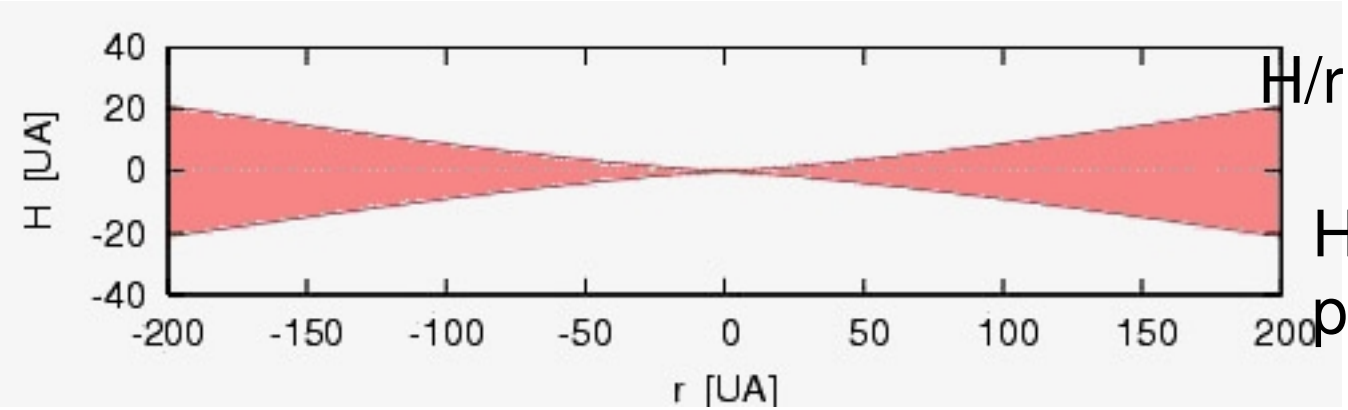


Image HST d'un jeune système stellaire, avec disque vu par la tranche.

Jet de plasma vert dans la direction perpendiculaire au disque (suit les lignes de champ magnétique).

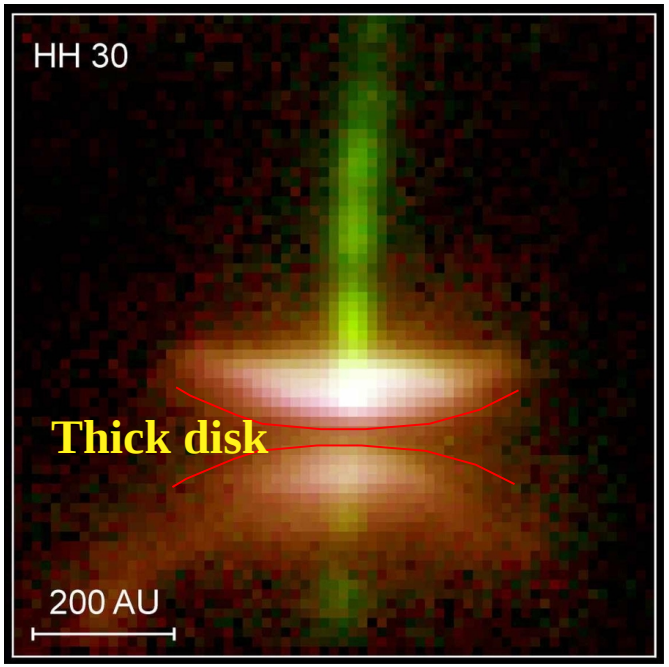
Zone claire = gaz et poussière illuminés par l'étoile centrale.
Zone sombre = dépot de poussières dense (la lumière ne passe pas).

Structure du Disque



$H/r = \sim 0.05 * (r/1UA)^{\beta}$

Hauteur due à la pression du gaz.



Gaz parfait: $PV=nRT$, ou $P=\rho T(R/\mu)$

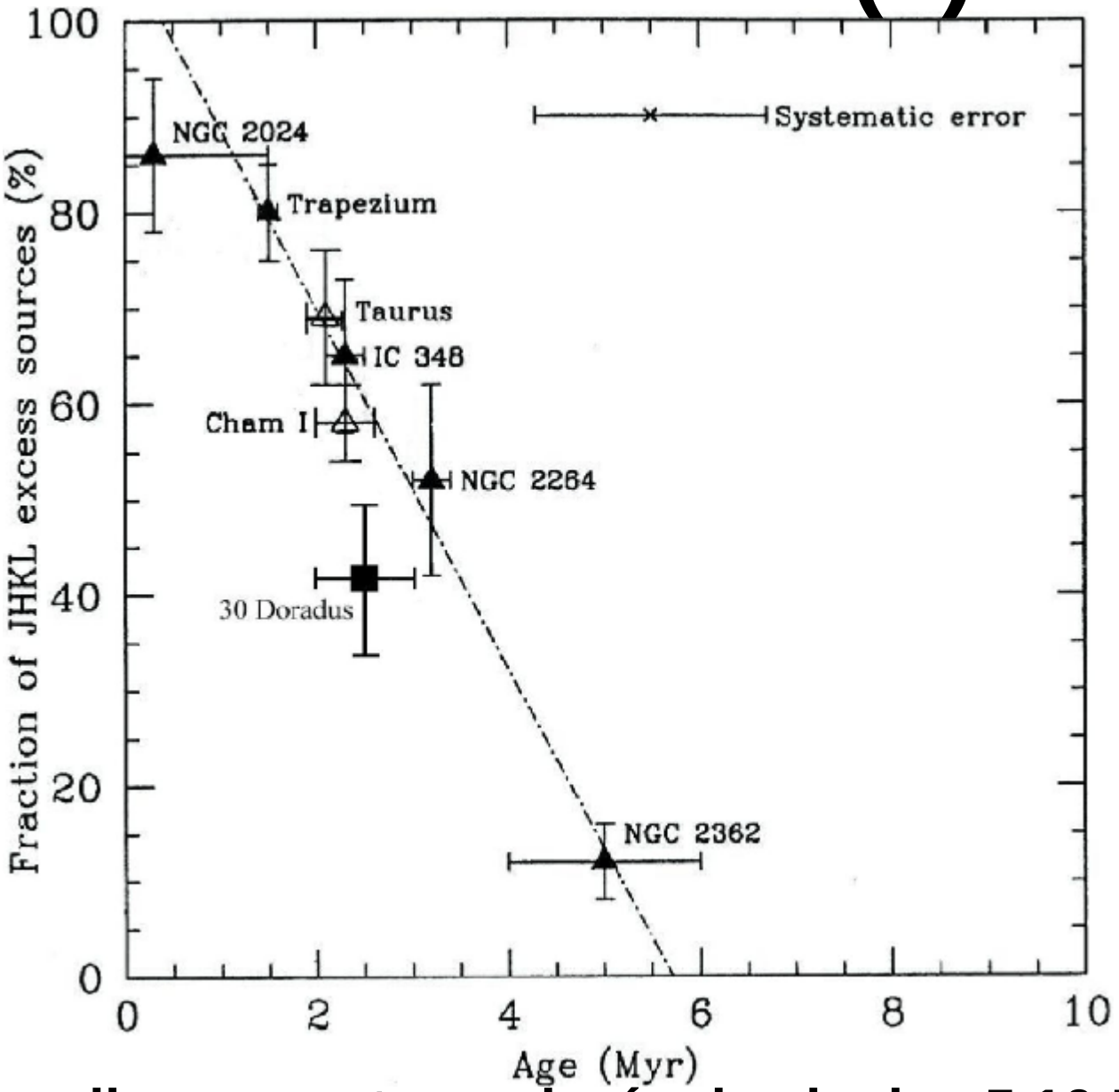
Équation d'état : $P = c_s^2 \rho / \gamma$.

D'où $T=(c_s^2 \mu) / (\gamma R)$.

À r fixé, l'équilibre hydrostatique vertical donne $\rho=\rho_0 \exp(- z^2 / (2H^2))$.

avec $H = c_s / \Omega \gamma^{1/2}$, échelle de hauteur.

Observations (3)



- **Les disques ont une durée de vie de ~5 10 Ma.**

Modèle de formation planétaire

Grains (0.1 mm) =>
agitation moléculaire

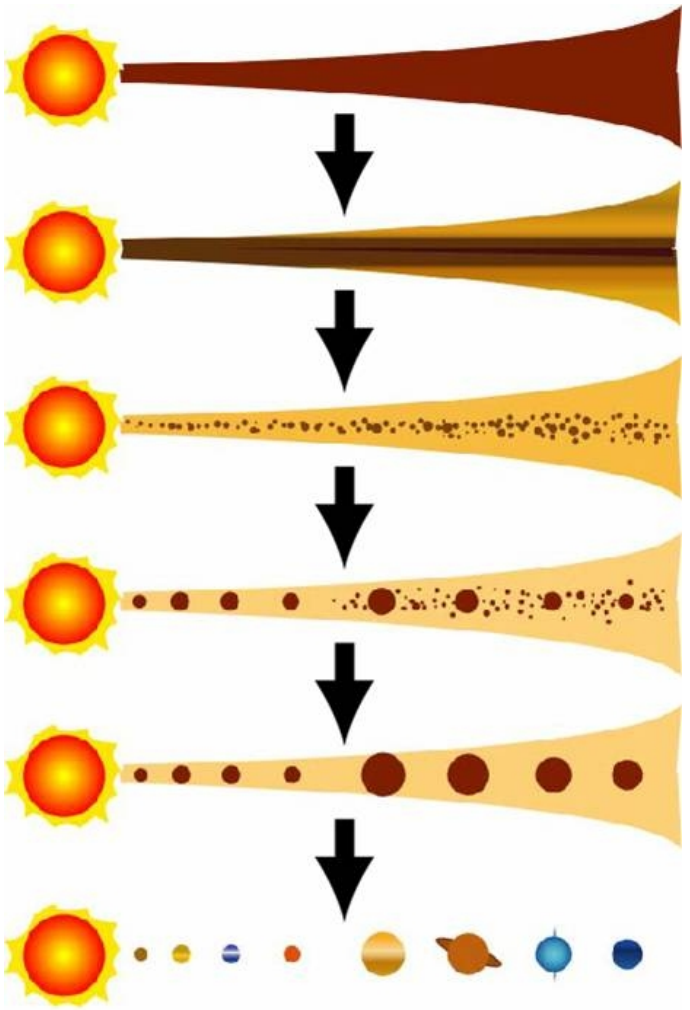
Agrégat (mm) =>
turbulence

Flocons (cm) =>
???

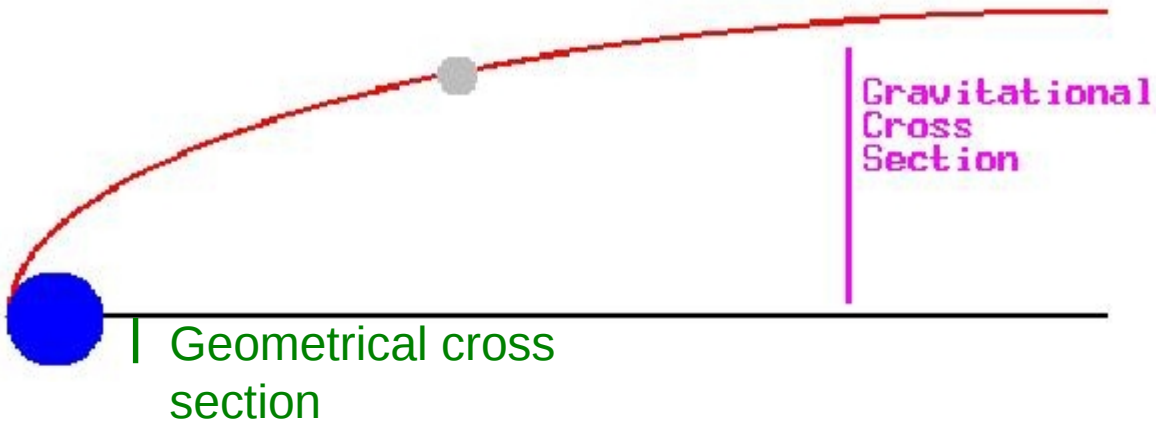
Au-delà de 10m =>
gravitation

Protoplanètes (1000km) =>
collisions géantes

Planètes (en ~100 millions d'années).



COLLISIONS

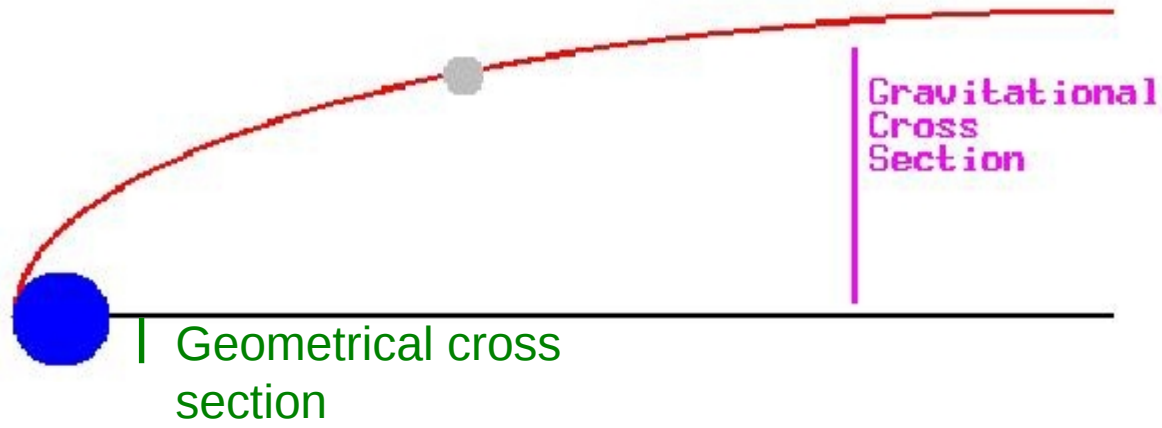


<u>Section efficace géométrique :</u> $\sigma_{géom} = \pi R^2$

Que vaut la section efficace gravitationnelle ?

Quel est le paramètre d'impact b maximum pour qu'il y ait collision avec l'objet de masse M et de rayon R, si la vitesse initiale est v_0 ?

COLLISIONS



Focus gravitationnel : $F_g = \sigma_{grav}/\sigma_{géom}$

$= b_{max}^2/R^2$

$\mathbf{F_g = 1 + (v_{esc}/v_0)^2}$,

où $v_{esc}^2 = 2GM/R$.

Croissance : $dM/dt \sim R^2F_g \sim M^{2/3}F_g$

Allo, allo! Ici la Terre ! Vous venez d'atteindre la vitesse de libération, qui est de 11 km/s, vous n'êtes donc plus soumis à l'attraction terrestre.



CROISSANCE EMBALLÉE

1) Cas $v_0 << v_{esc}$ (disque peu agité).

Alors, $F_g \sim v_{esc}^2 / v_0^2 \sim M^{2/3} / v_0^2$.

Soient deux objets de masses $M_1 > M_2$.

$dM_i/dt \sim M_i^{4/3} / v_0^2$;

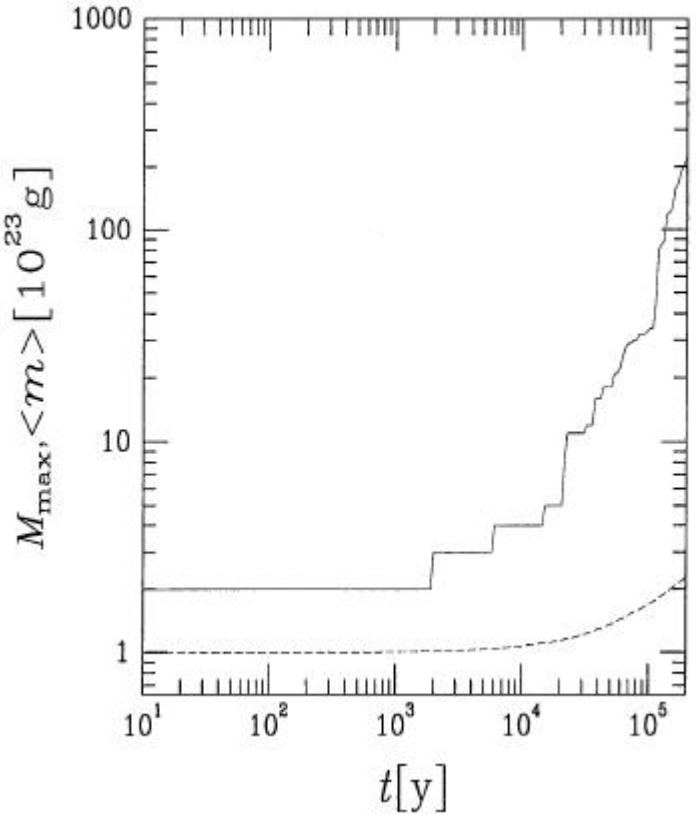
$(1/M_i)\,(dM_i/dt) \sim M_i^{1/3} / v_0^2$.

Donc $d(M_1/M_2)/dt = M_1/M_2\,[\,(1/M_1)(dM_1/dt) - (1/M_2)(dM_2/dt)\,] > 0$.

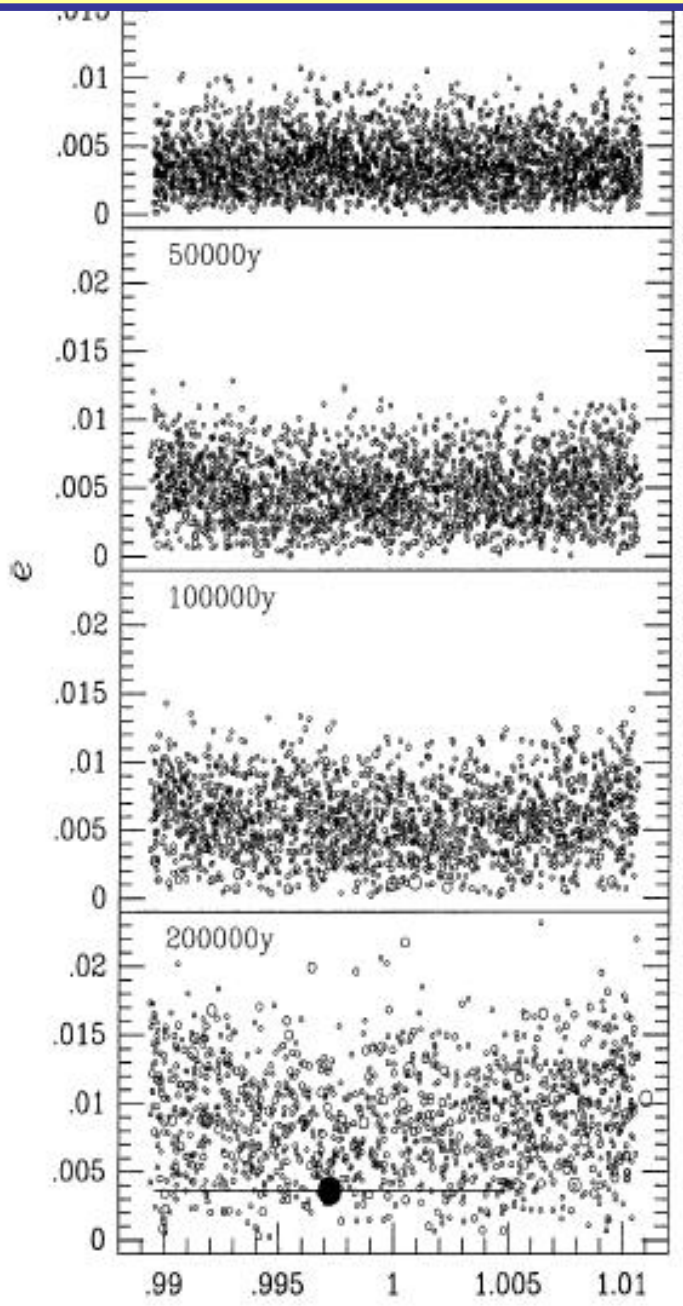
Autrement dit : les écarts de masse s'accroissent, les plus gros grandissent plus vite et deviennent encore plus gros.

Croissance emballée ou runaway.

CROISSANCE EMBALLÉE



CROISSANCE EMBALLÉE



Kokubo and Ida, 2000

Initially 3,000 10^{23}g planetesimals

End: 1,322 planetesimals + 2x10^{25}g `embryo'

La croissance emballée marche tant que $v_{rel} << v_{esc}$.

Mais v_{rel} augmente à cause des perturbations du plus gros corps, jusqu'à ce que $v_{rel} \sim v_{esc}$.

CROISSANCE OLIGARCHIQUE

2) Cas $v_0 \sim v_{esc}$ (disque agité).

Alors, $F_g \sim 1$.

Soient deux objets de masses $M_1 > M_2$.

$dM_i/dt \sim M_i^{2/3} / v_0^2$;

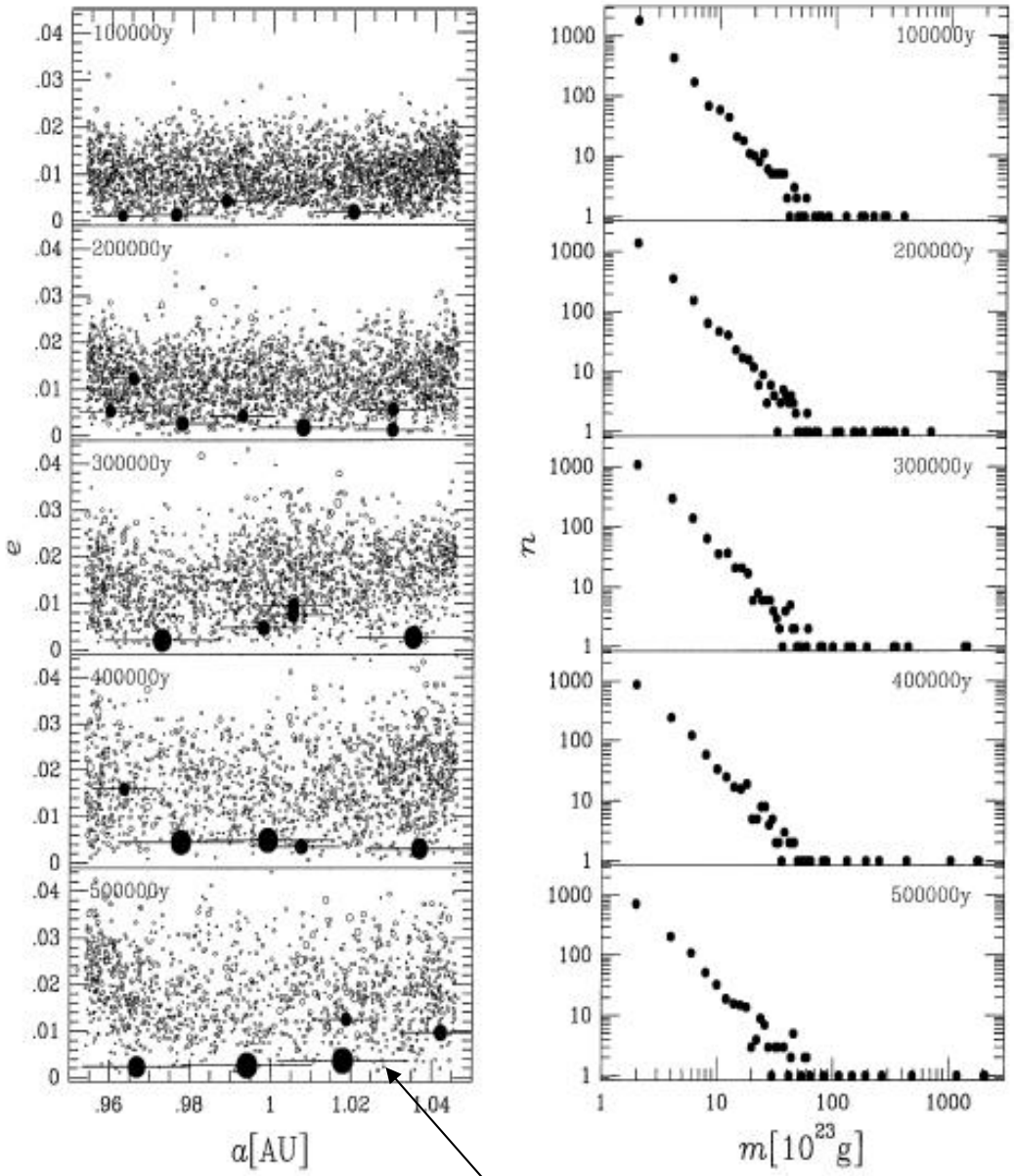
$(1/M_i)\,(dM_i/dt) \sim M_i^{-1/3} / v_0^2$.

Donc $d(M_1/M_2)/dt = M_1/M_2\,[\,(1/M_1)(dM_1/dt) - (1/M_2)(dM_2/dt)\,] < 0$.

Autrement dit : les écarts de masse parmis les gros objets se réduisent.

Croissance oligarchique : les gros formés précédemment dominent et croissent ensemble en accrétant les planétésimaux, jusqu'à ce qu'ils aient accrété tous les solides dans leur zone d'influence.

CROISSANCE OLIGARCHIQUE



Again from Kokubo and Ida, 2000

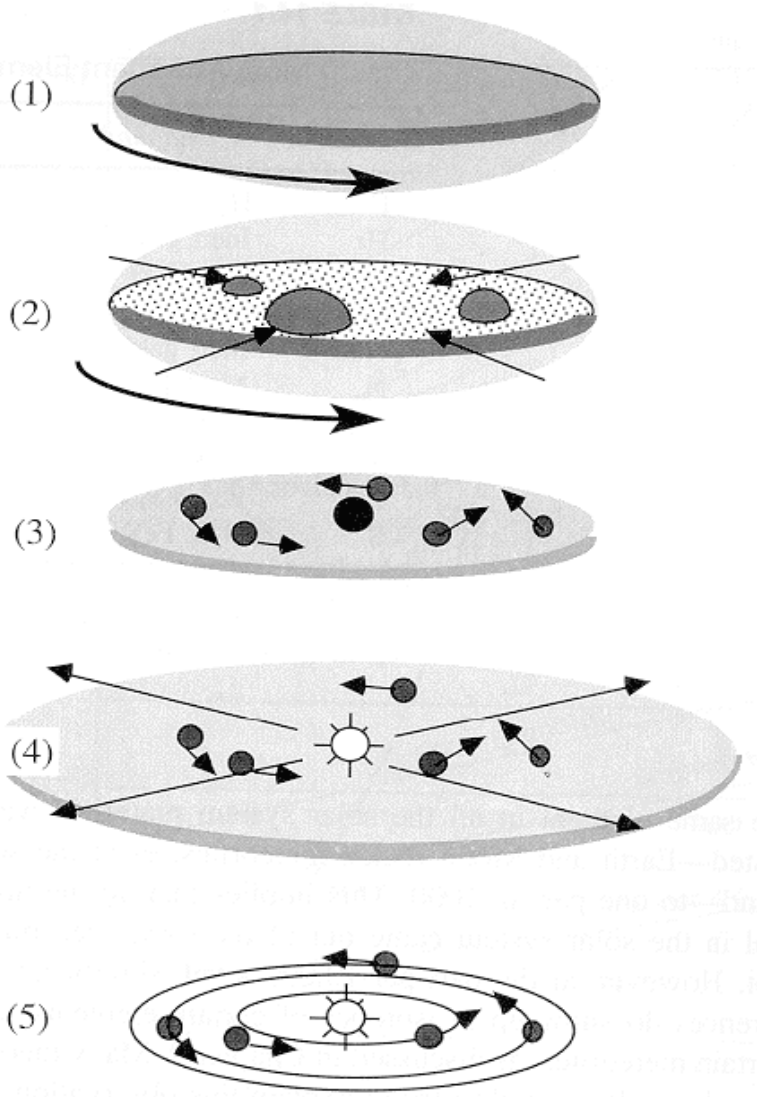
Filled dots: mass > 2×10^{25}g

Masse finale des embryons ~ $\Sigma^{3/2} r^3$,

où Σ est la densité de surface de solides.

Séquence de l'accrétion

- **1. Formation du disque**
- **2. Coagulation initiale (~10km, ~10^4 ans)**
- **3. Croissance (jusqu'à taille lune, ~10^5 yrs)**
- **4. Croissance jusqu' à taille Mars , ~10^6 ans), perte de gaz**
- **5. Collisions tardives (~10^{7-8} ans)**



LIGNE DES GLACES

La température dans le disque proto-planétaire est inversement proportionelle à la distance au Soleil.

Près du Soleil, il fait chaud, l'H_20 est sous forme de vapeur.

Loin du Soleil, l'H_20 est sous forme solide : il neige !

La limite s'appelle la *ligne des glaces* (snowline).
Elle est à environ 3-4 UA.

Au delà de la ligne des glaces, les planétésimaux sont faits à moitié de glace => comètes >< astéroïdes secs.

Aussi, il y a plus de solides, donc on peut former des embryons plus gros.

LIGNE DES GLACES

Ainsi, en deça de 3 UA se forment des objets rocheux et métalliques, dépourvus d'eau : ce sont les ancêtres des planètes telluriques et des astéroïdes.

Au delà de 3 UA, on obtient des objets composés de roches, métaux, et glaces (d'eau, de CO_2, de méthane...), et plus gros.

Les plus petits deviendront des comètes, les plus gros seront les coeurs des planètes géantes.

RÉSUMÉ DE L'ÉPISODE PRÉCÉDENT

1) Runaway growth

2) Oligarchic growth

Apparition d'embryons ou de coeurs, de masse ~ $\Sigma^{3/2}\, r^3$.

3a) En deçà de la ligne de glaces :
petits embryons, impacts géants, formation des planètes telluriques en ~100 Ma.

3b) Au delà de la ligne de glaces :
gros embryons (coeurs), accrétion de gaz, formation de planètes géantes.

Comment ?

FORMATION DES PLANÈTES GÉANTES

a/ Rétention du gaz.

La vitesse d'échappement à la surface d'un corps de masse M_p et de rayon R_p est : $v_{esc} = \sqrt{(2GM_p/R_p)}$.

La vitesse moyenne des molécules de gaz est la vitesse du son $c_s \sim T(r)$.

Capture de gaz possible si $c_s < v_{esc}$.

À 1 UA, avec une densité de solide (~4 kg/L), cela donne $M_p > 0{,}01M_\oplus$.
Seuil ≈ $0{,}3M_\oplus$ à 10UA.

b/ Structure de cette atmosphère primitive.

Équilibre hydrostatique : $dP / dr = - (GM(r) / r^2) \rho(r)$,

où M(r) = masse à l'intérieur de la sphère de rayon r : $dM(r) / dr = 4\pi r^2 \rho(r)$.

Cherchons la masse d'équilibre alors que l'accrétion continue…

FORMATION DES PLANÈTES GÉANTES

b/ Structure de cette atmosphère primitive.

Énergie : Beaucoup d'énergie potentielle à perdre pour accréter.
Taux d'énergie (luminosité) apporté par l'accrétion des solides sur le cœur :
$L_{cœur} = (GM_{cœur} / r_{cœur}) (dM_{cœur} /dt)$.

Cette énergie doit être rayonnée par l'atmosphère.
Transfert radiatif (ou convection) → température, T(r), M(r), et P(r) connues.

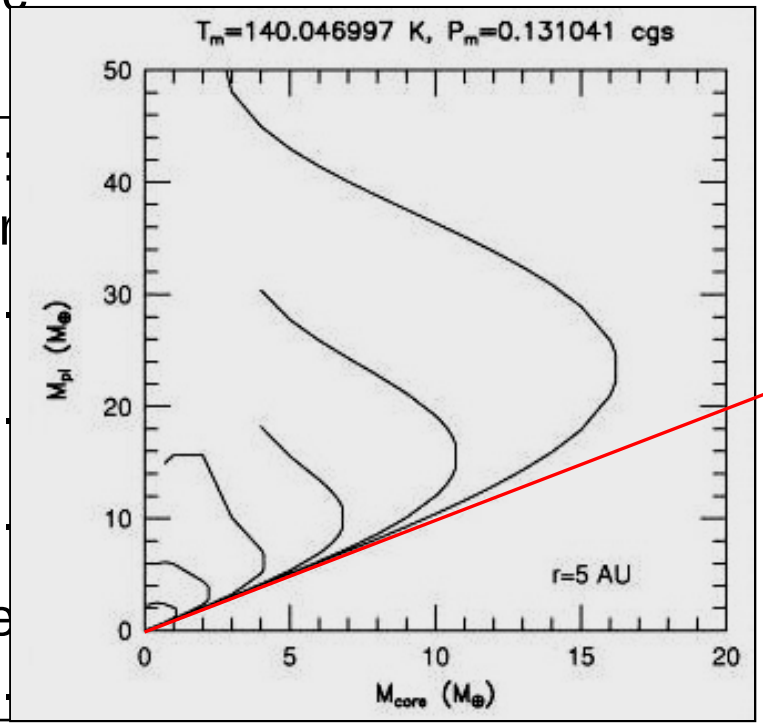
Le rayonnement de $L_{cœur}$ détermine la struc-
-ture de l'atmosphère. D'où $M_p = M(R_H)$.

Figure (Papaloizou & Terquem, 1999) :
M_p en fonction de $M_{cœur}$, à 5 UA, pour
$dM_{cœur} /dt = 10^{-11, 10, 9, 8, 7, 6}\ M_\oplus$/an.

Ligne rouge : $M_p = M_{cœur}$, pas d'atm.

Pour chaque $M_{cœur}$, il y a 2 solutions.

On part de 0 → au fil de l'accrétion de
la planète, l'atmosphère grossit aussi.



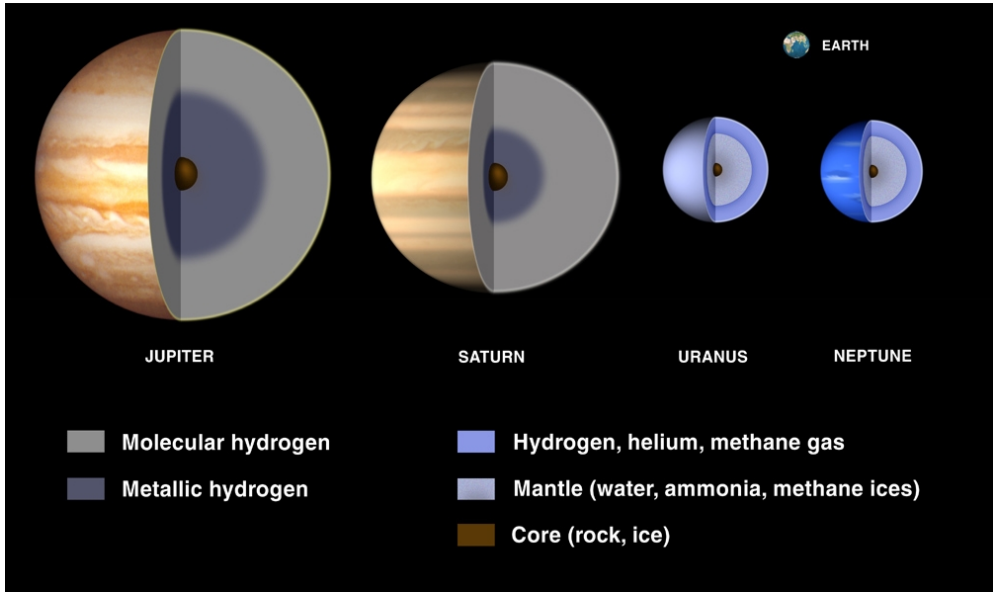
FORMATION DES PLANÈTES GÉANTES

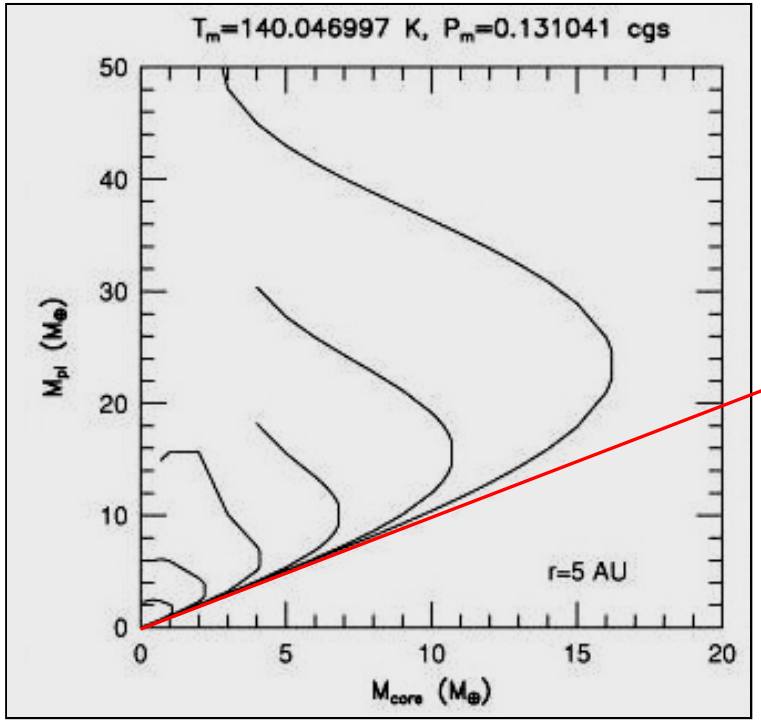
c/ Effondrement.

Pour tout taux d'accrétion, il existe une masse de cœur maximale au delà de laquelle un équilibre hydrostatique de l'atmosphère n'est pas possible.

Il y a donc effondrement de l'atmosphère et croissance exponentielle de la planète → formation d'une planète géante, dont le rayon est petit devant son rayon de Hill.

Cœurs: Saturne ~ 15 $M_\oplus$. Jupiter < 10 $M_\oplus$





FORMATION DES PLANÈTES GÉANTES

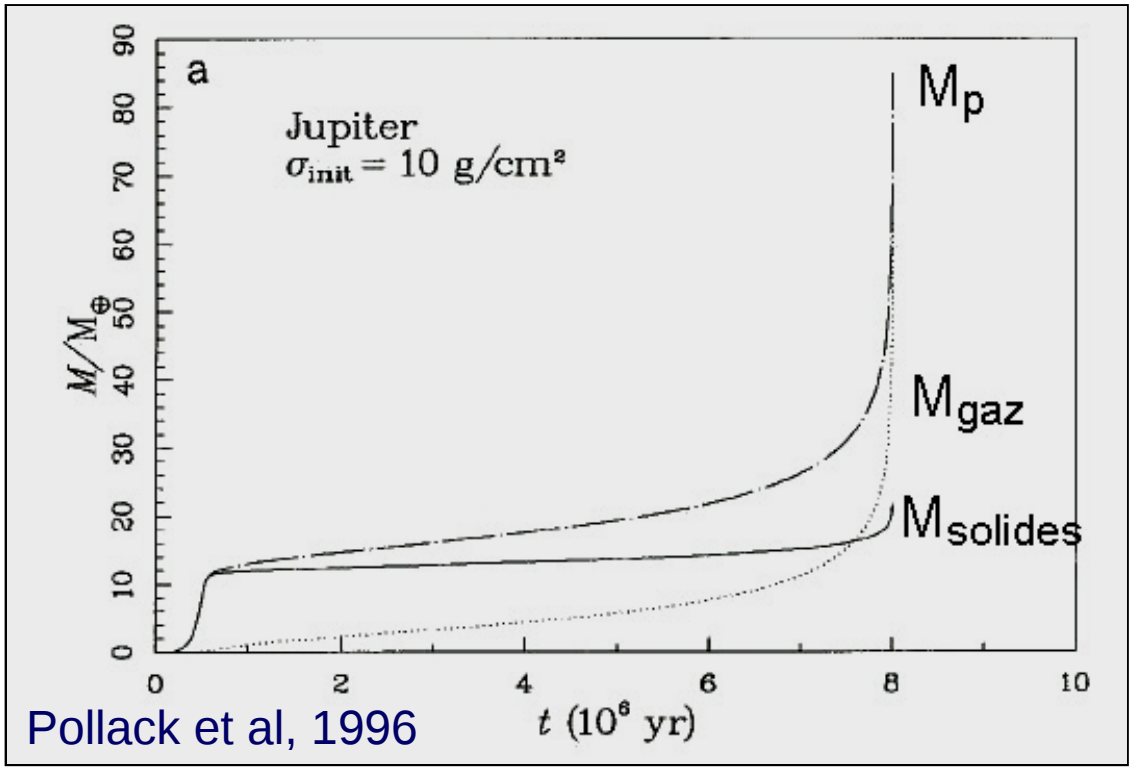
Résumé : 3 phases

- Formation d'un cœur solide.
- Atmosphère. Croissance lente par accrétion de solides et de gaz.
- Effondrement. Croissance emballée (à partir de ~20-30 $M_\oplus$).

Problème :

La phase avant l'effondrement est très lente, comparable à la durée de vie du disque…

NB: $dM_{cœur} / dt$ pourrait être augmenté en tenant compte de la migration (voir plus tard).



Pollack et al, 1996

FORMATION DES PLANÈTES GÉANTES

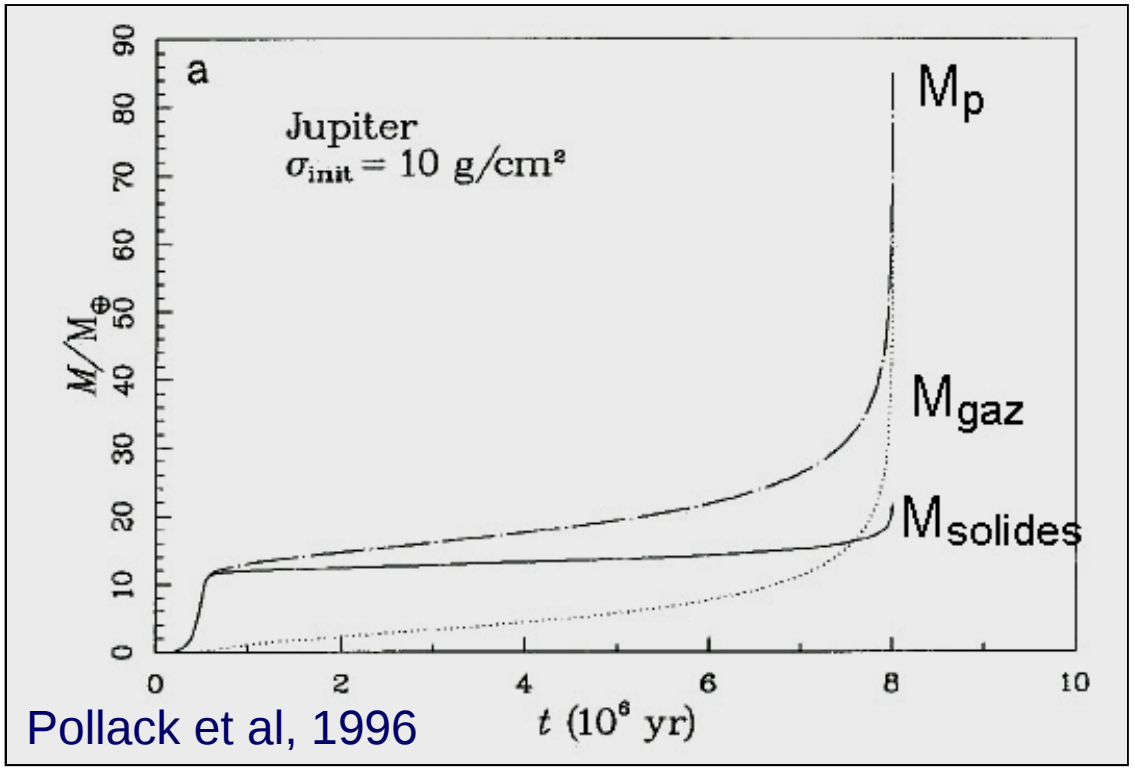
Résumé : 3 phases

- Formation d'un cœur solide.
- Atmosphère. Croissance lente par accrétion de solides et de gaz.
- Effondrement. Croissance emballée (à partir de ~20-30 $M_\oplus$).

Remarque :

Pour obtenir $20M_\oplus$ de solides, il vaut mieux être au delà de la ligne des glaces.

On s'attend à ce que les planètes géantes se forment loin de l'étoile.



Pollack et al, 1996

CONCLUSION

Les planètes se forment dans des disques de gaz et de poussière autour des étoiles jeunes
- en quelques millions d'années
- dans un plan autour de l'étoile
- donc leur vecteur « moment cinétique » est dans le même sens que celui de l'étoile.

Puis le disque de gaz se dissipe, et le système planétaire reste pour plusieurs milliards d'années.

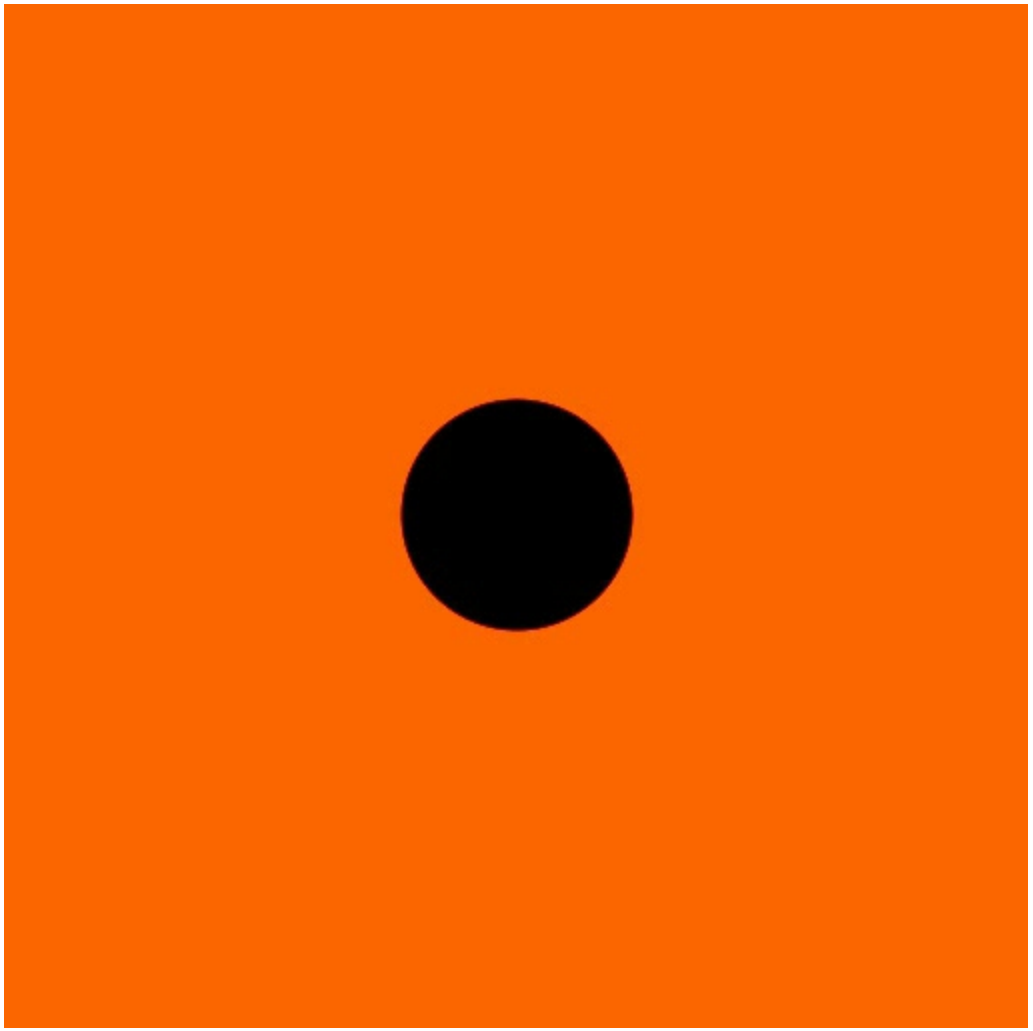
Vraiment ?

MIGRATION PLANÉTAIRE



Notions de migration planétaire

Une planète en *orbite circulaire* dans un disque Képlérien y excite un sillage spiral



On place une masse ponctuelle en orbite circulaire uniforme dans un disque képlérien initialement de densité de surface uniforme.

Ce sillage est en corotation avec la planète : il tourne à la même vitesse

Antagonisme des couples interne / externe



Le sillage du disque externe exerce donc un couple négatif sur la planète

Antagonisme des couples interne / externe

Le sillage du disque interne
est en avance sur la planète



Le sillage du disque externe exerce donc un couple négatif sur la planète

Le sillage du disque interne exerce donc un couple positif sur la planète

l’emporte, il faut les évaluer.

Bilan des couples

Note: il n’y a aucune raison pour que ces deux couples s’annulent strictement.



En général, la somme est négative et la planète perd du moment cinétique orbital.

Le rayon de son orbite diminue :
c'est la migration planétaire !

Migration de type I

La migration en régime linéaire est souvent appelée migration de type I.

La migration de type I concerne donc les protoplanètes de *petite* masse.

Typiquement, une protoplanète dont la masse est inférieure à quelques masses terrestres subit une migration de type I.

Ordre de grandeur de la vitesse de dérive

Pour une protoplanète de masse terrestre, à une unité astronomique d'un objet central de masse solaire, immergée dans une nébuleuse protoplanétaire « de masse minimale » (MMSN) :

$\Sigma = 1700$ g.cm^{-2}
H/R = 0.05

➔ Temps de migration vers l'objet central : 200,000 ans

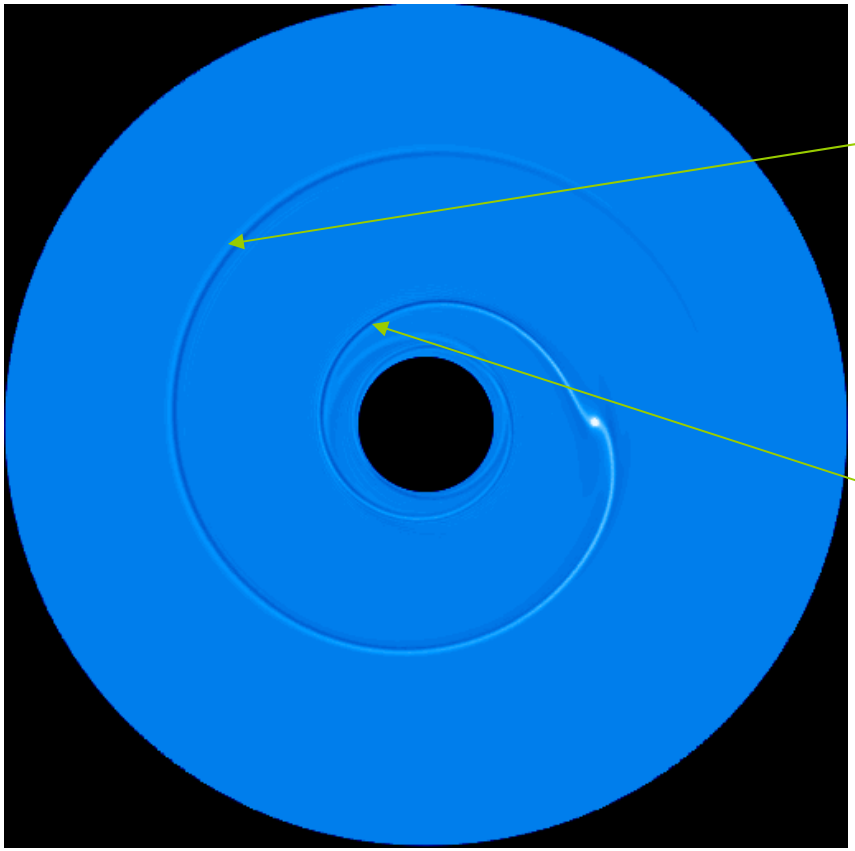


Donc, une protoplanète de 5 masses terrestres à 1 UA, dans un disque 3 fois plus massif que la MMSN, et deux fois plus épais (*H/R = 0.1*) migrerait en :

200,000 / 5 / 3 * 2^2 ~ 53,000 ans

Effet sur le disque

Si la planète est assez massive, elle perturbe la densité du gaz



Le sillage externe tourne plus vite que la matière sous-jacente.
Il l'accélère et la repousse plus loin.

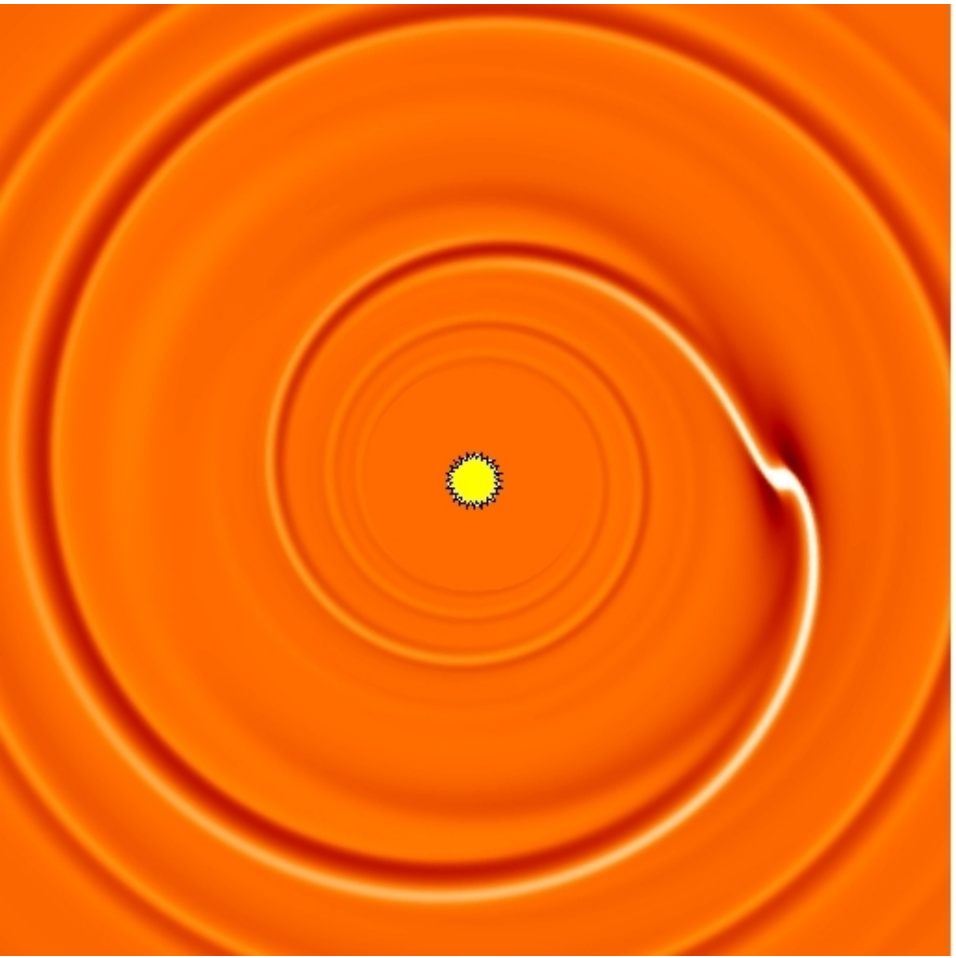
En revanche, le sillage interne tourne moins vite que la matière sous-jacente.
Il la freine, et la fait tomber sur l'étoile.

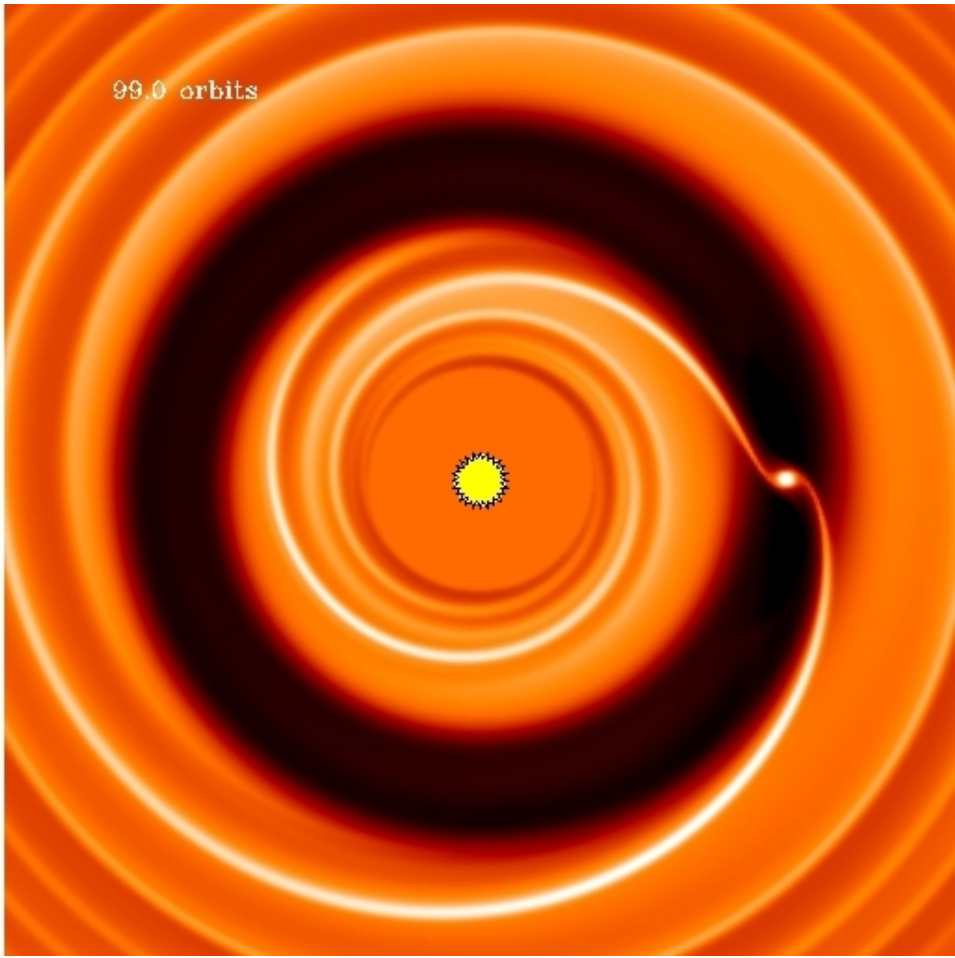
Ouverture d'un sillon



Ouverture d’un gap

En ~100 orbites, une planète géante de type Jupiter repousse le disque autour de son orbite, et ouvre un sillon.

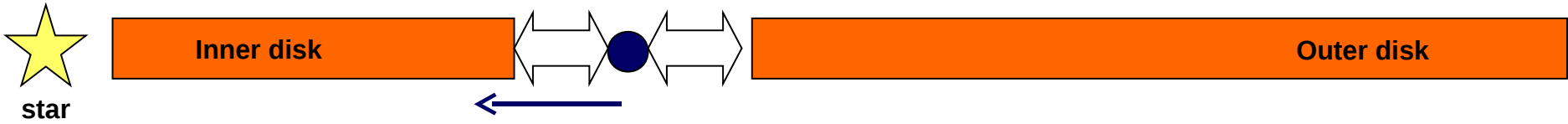




Migration de type II

La planète est repoussée
vers l'extérieur par le disque interne
vers l'intérieur par le disque externe.

Elle est bloquée au milieu du sillon, et ne peut plus migrer **par rapport** au gaz du disque.



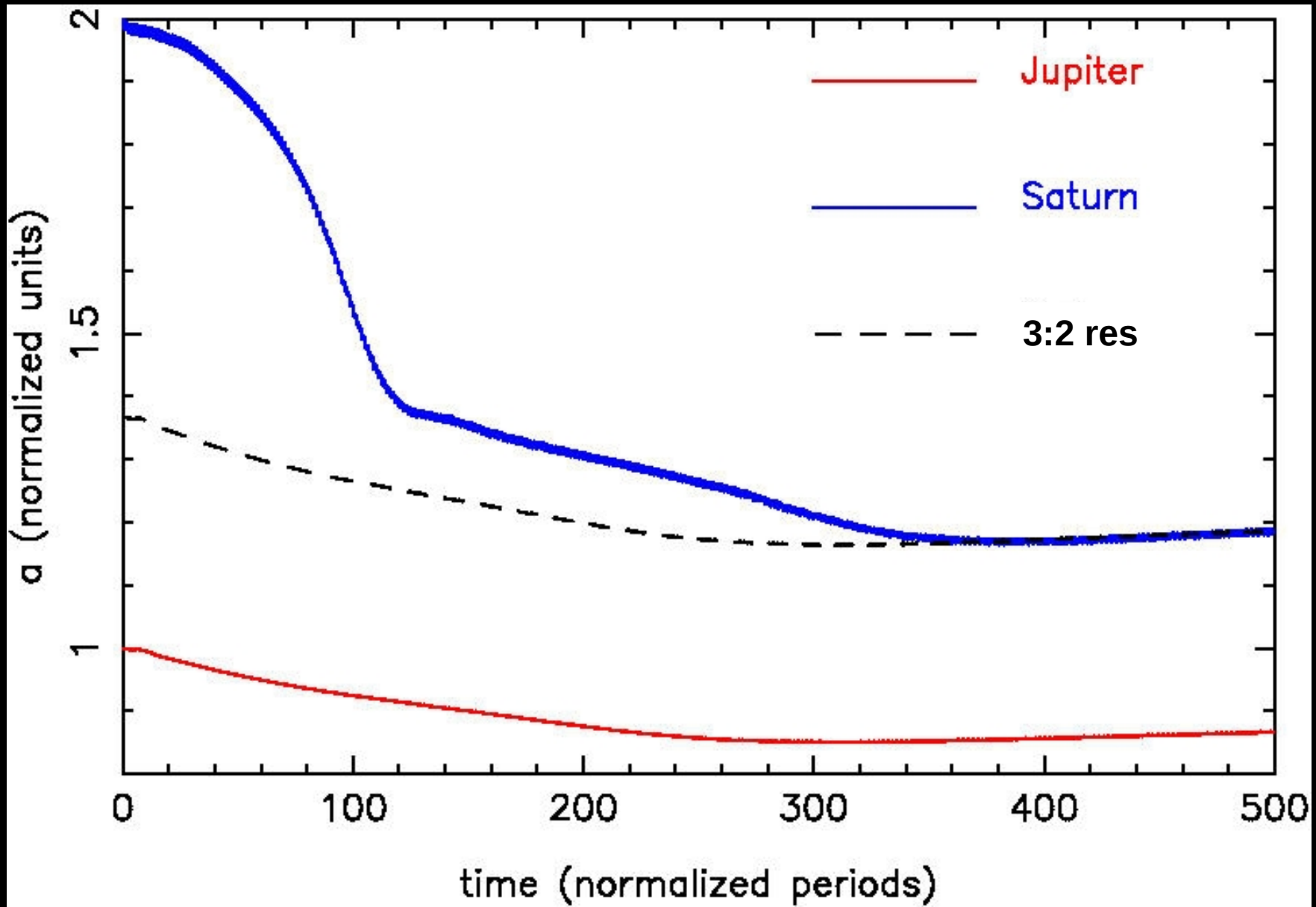
Mais le disque tombe en permanence sur l'étoile, entrainant la planète vers l'intérieur.

La planète suit l'accrétion visqueuse du disque vers l'étoile.

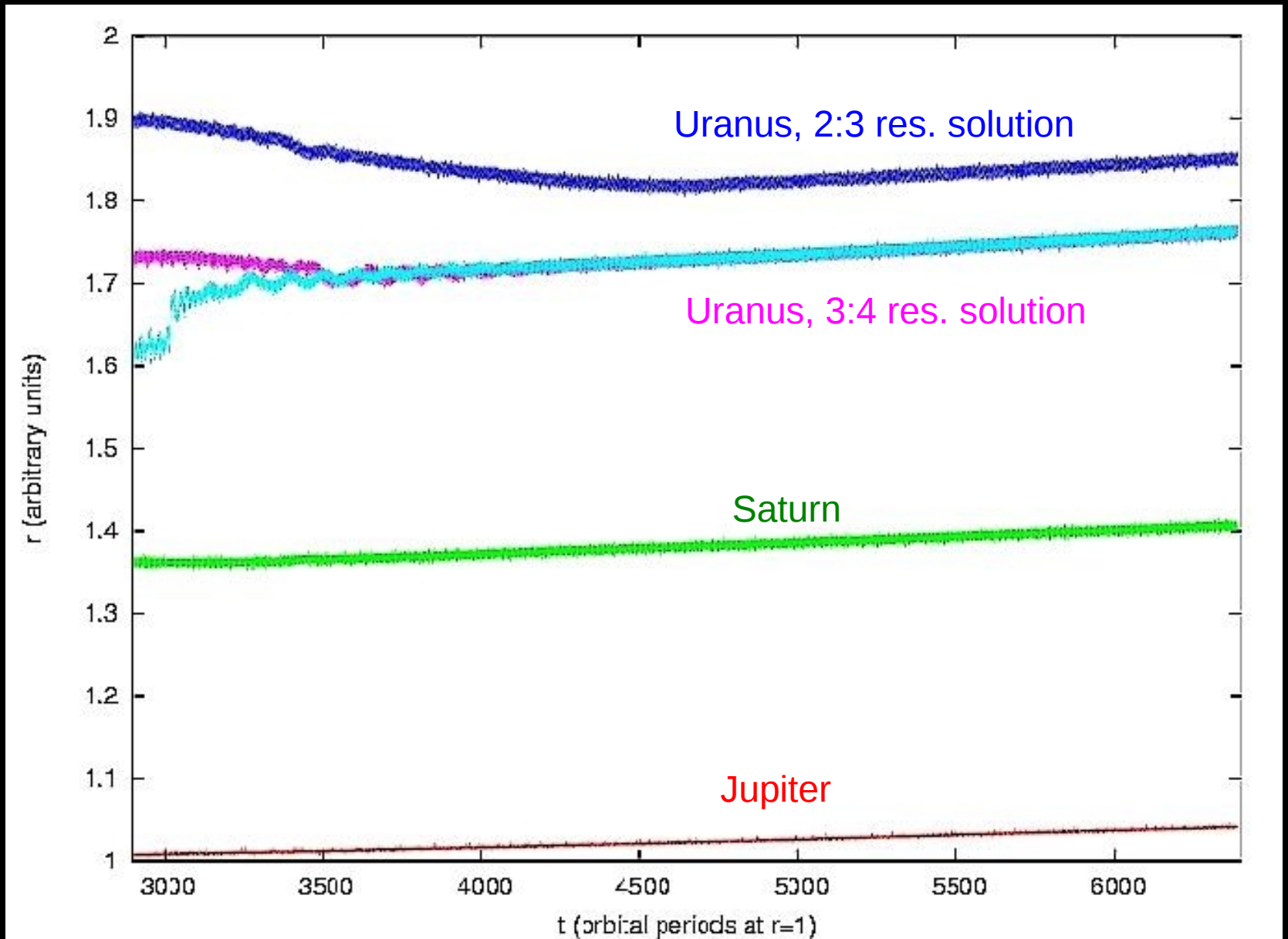
Que s'est-il passé
dans le système solaire ?

Pourquoi Jupiter n'est pas « chaud » ?

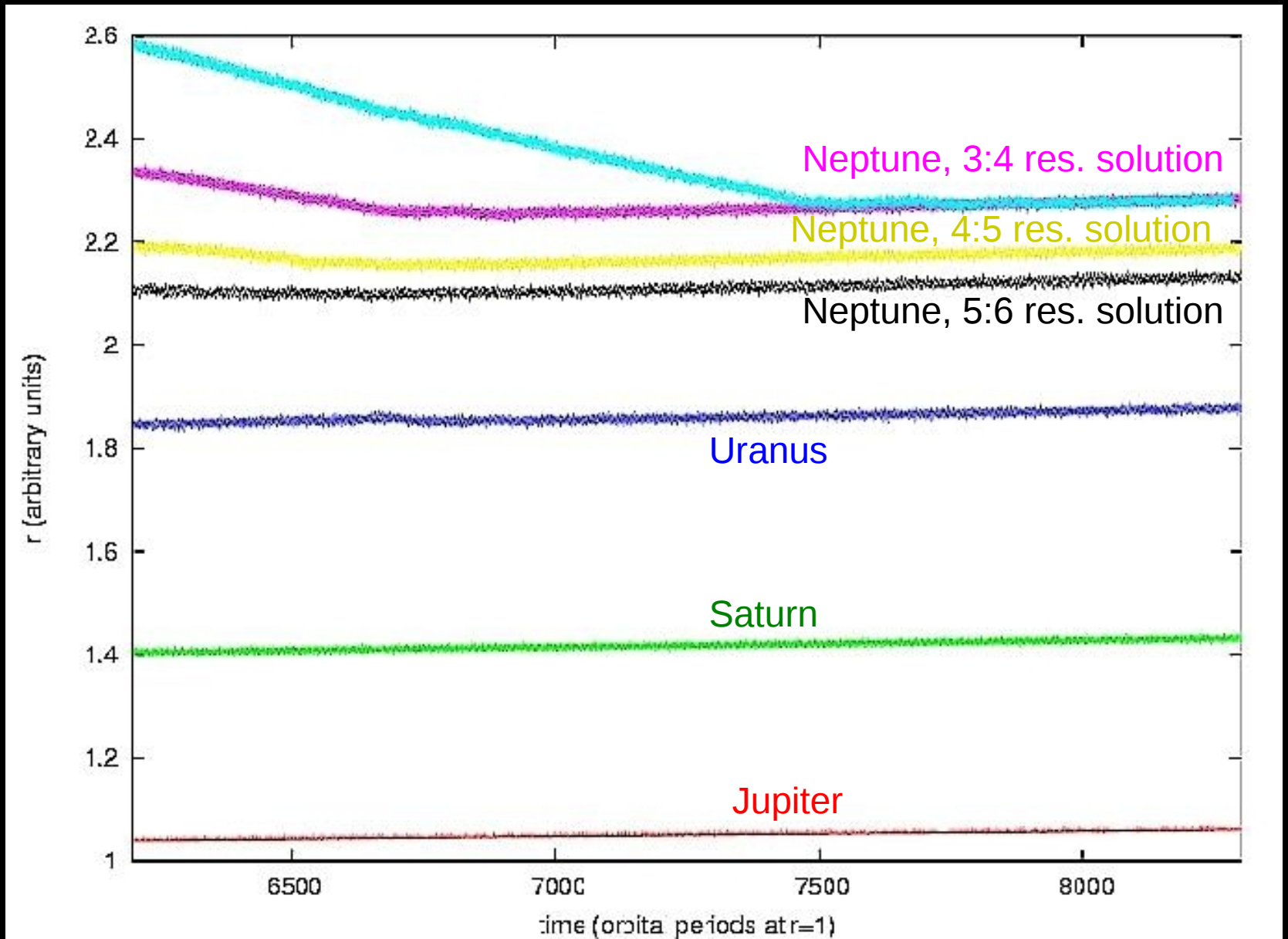
Saturne ouvre un sillon derrière Jupiter, cela arrête la paire de planètes qui entrent en résonance.



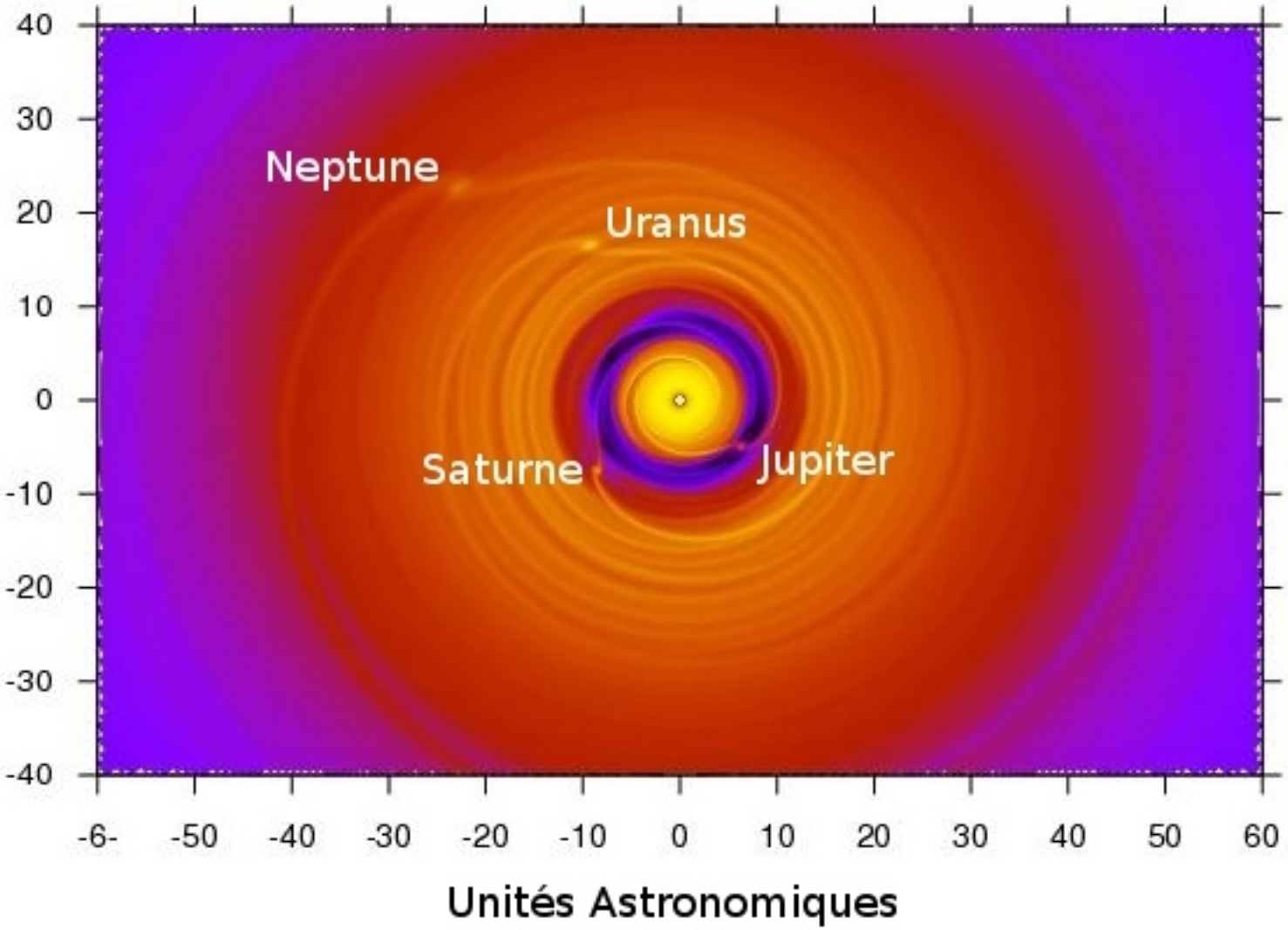
Et si on rajoute Uranus



Et Neptune...


Neptune, 3:4 res. solution
Neptune, 4:5 res. solution
Neptune, 5:6 res. solution
Uranus
Saturn
Jupiter
r (arbitrary units)
2.6
2.4
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
6500
7000
7500
8000
time (orbita periods at r=1)

À la fin de la formation du Système Solaire, on a les quatre planètes géantes en configuration compacte, en résonance : rien à voir avec le système solaire actuel !



MODELE de NICE !!!

Les planètes géantes dans cette configuration compacte sont entourées d'une grande ceinture d'astéroïdes, restes de la formation planétaire.

Ces planétésimaux perturbent lentement les planètes géantes. À un moment, la configuration devient instable. Les orbites deviennent très excentriques, ce qui déstabilise les planétésimaux. Le processus s'emballe !

Résultat ?



Le MODÈLE de NICE

Une instabilité globale, tardive dans la configuration des planètes géantes

- rencontres proches entre planètes géantes

- changement radical de leurs orbites -> positions actuelles.

- chutes de planétésimaux dans tous les système solaire -> Grand Bombardement Tardif.

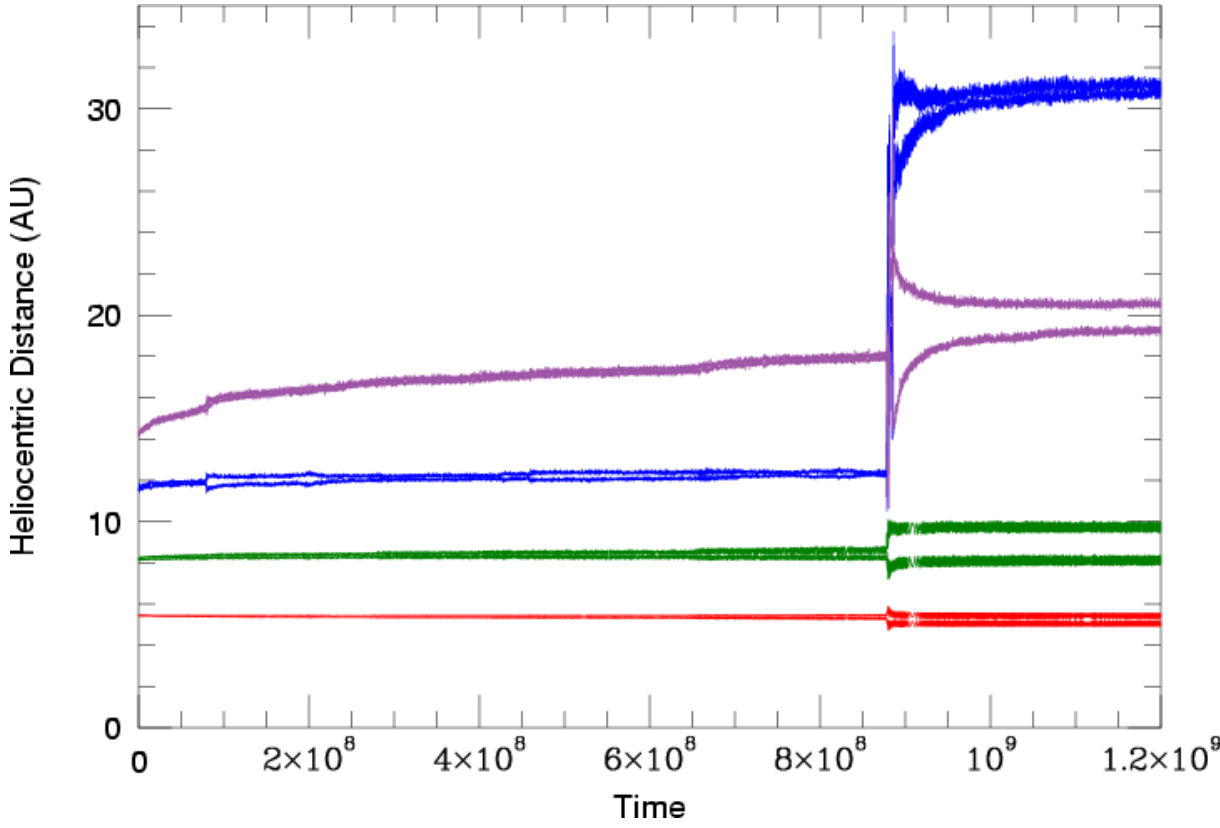
(Gomes, Levison, Tsiganis, Morbidelli, 2005 ;

Tsiganis, Gomes, Morbidelli, Levison, 2005)

POINTS FORTS du Modèle de Nice

I: Explication les orbites actuelles des planètes géantes: leurs demi grands axes, leurs excentricités et inclinaisons en partant d'orbites circulaires.

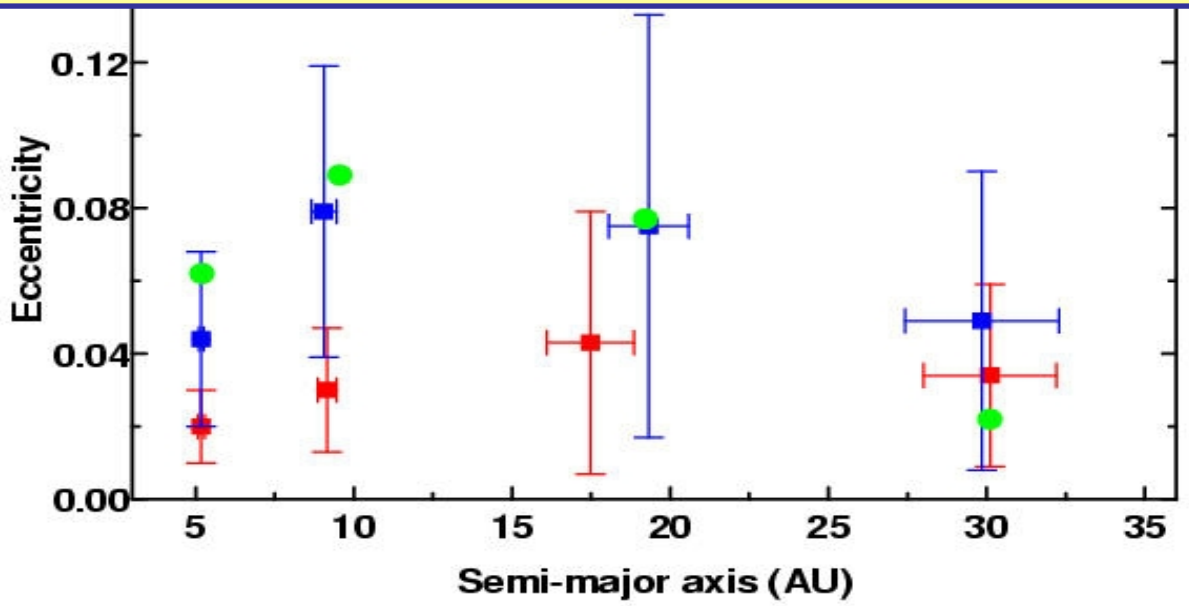
K. Tsiganis, R. Gomes, A. Morbidelli, H.F. Levison 2005.
Nature, 435, 459

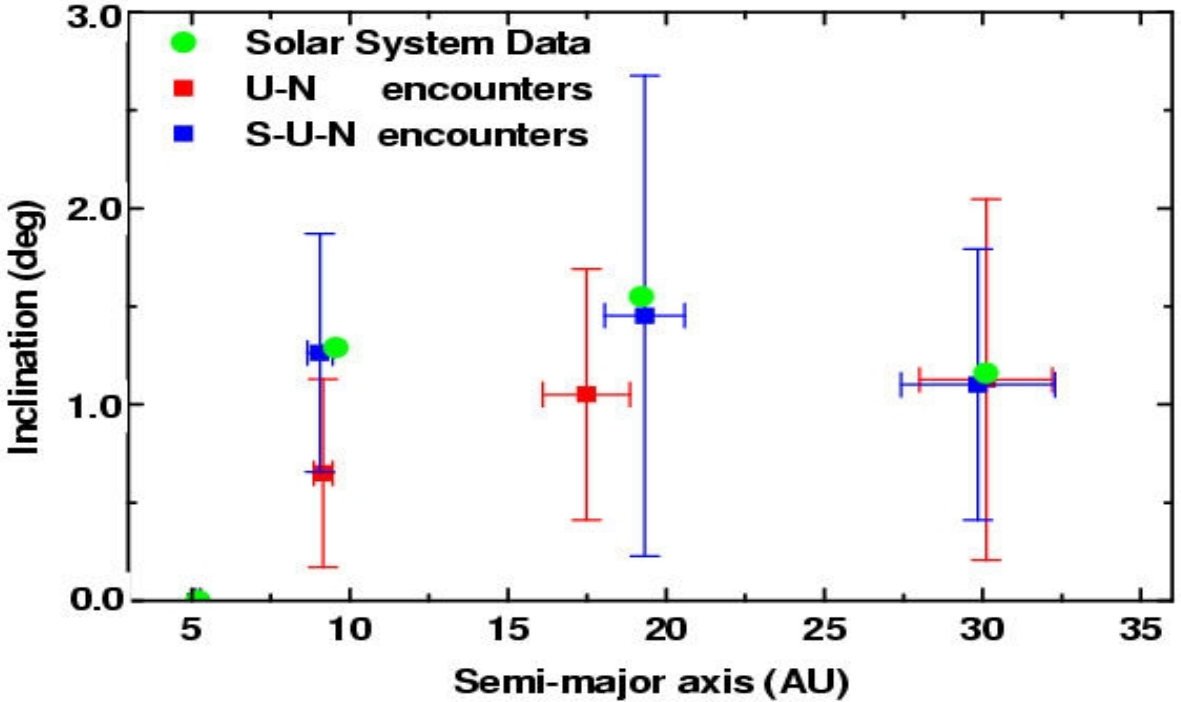


POINTS FORTS du Modèle de Nice

I: Explication les orbites actuelles des planètes géantes: leurs demi grands axes, leurs excentricités et inclinaisons en partant d'orbites circulaires.

K. Tsiganis, R. Gomes, A. Morbidelli, H.F. Levison 2005.
Nature, 435, 459

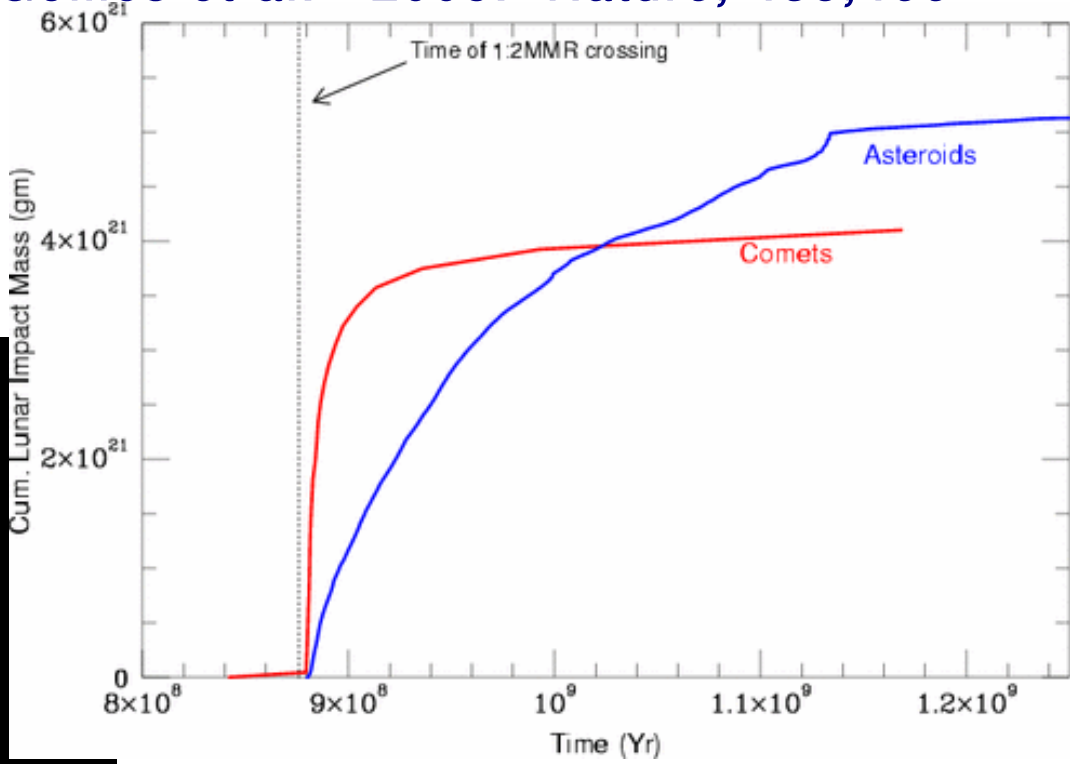




POINTS FORTS du Modèle de Nice

II: Un bombardement cométaire et astéroïdal tardif, de la bonne magnitude par rapport aux contraintes dues aux cratères lunaires. R. Gomes et al. 2005. *Nature, 435,466*





POINTS FORTS du Modèle de Nice

III: Capture des satellites troyens de Jupiter et Neptune. A. Morbidelli et al. 2005. *Nature, 435,466*

IV: Capture des satellites irréguliers des planètes géantes.

V: Formation de la ceinture de Kuiper (et du nuage de Oort).

VI: Dépletion de la ceinture d'astéroïdes.

LES 3 PHASES DU SYSTÈME SOLAIRE

1. **La phase de l'accrétion planétaire**
   - Formation des planètes géantes
   - Formation des planètes telluriques
   - Première excitation/déplétion dynamique de la ceinture d'astroïdes
2. **Une phase tranquille de ~600 My**
   - Une ceinture d'astroïdes ~10-20 fois + massive qu'actuellement
   - Un disque trans-Neptunien massif (50 -> 35 M_{Terre})
3. **GRAND BOMBARDEMENT TARDIF**
   - Déplacement des orbites des planètes géantes
   - Formation des mers lunaires
   - Et autres phénomènes ?
4. **La phase actuelle**

RÉSUMÉ

Instabilité globale tardive, plusieurs centaines de millions d'années après la formation des planètes et la disparition du gaz.



<u>Références:</u>

Ciel & Espace
n°494, juillet 2011
n°502, mars 2012