



**Nébuleuses Solaires  
de Masse Minimale,  
Modèle de Nice,  
& Migration planétaire.**

**Aurélien CRIDA**

# 1) MMSN : définition, recette

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.

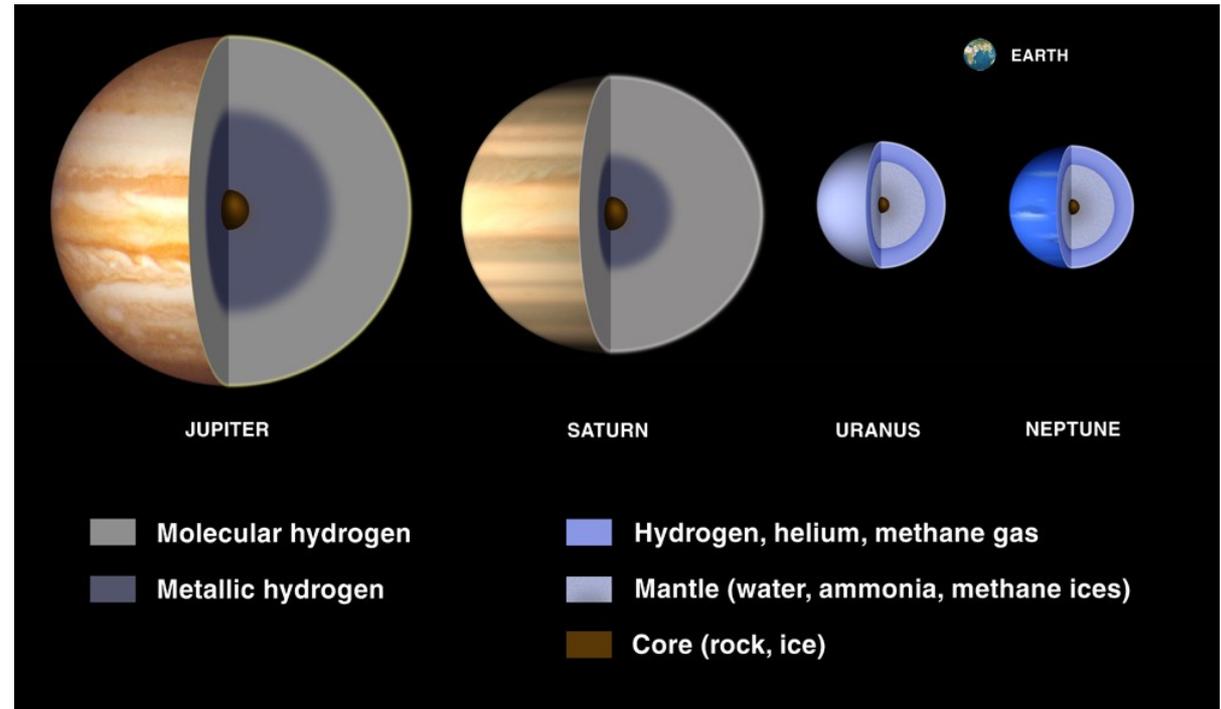
De Masse Minimale : contient juste ce qu'il faut de matière pour former les huit planètes.



# 1) MMSN : définition, recette

Combien faut-il de solides ?

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



Quels solides ?

Composition chondritique.

# 1) MMSN : définition, recette

## *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 ]

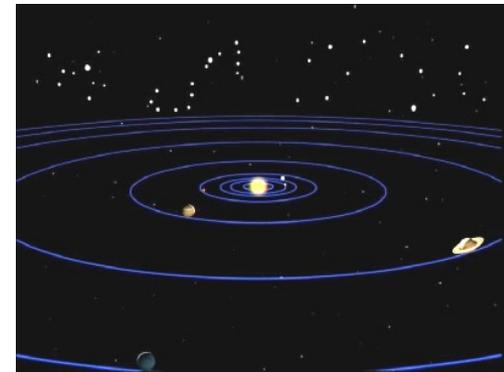
~15  $M_{\oplus}$  autour de 30 AU [ 25 : 35 ]

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 !



# 1) MMSN : définition, recette

$$\text{Hayashi (1981) : } \Sigma ( r ) = 1700 \left( \frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-1.5} \text{ g.cm}^{-2}$$

et Weidenschilling (1977).

## Importance de la MMSN :

Hayashi (1981) a été cité 326 fois, plus d'une fois par mois !

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

## Principales hypothèses :

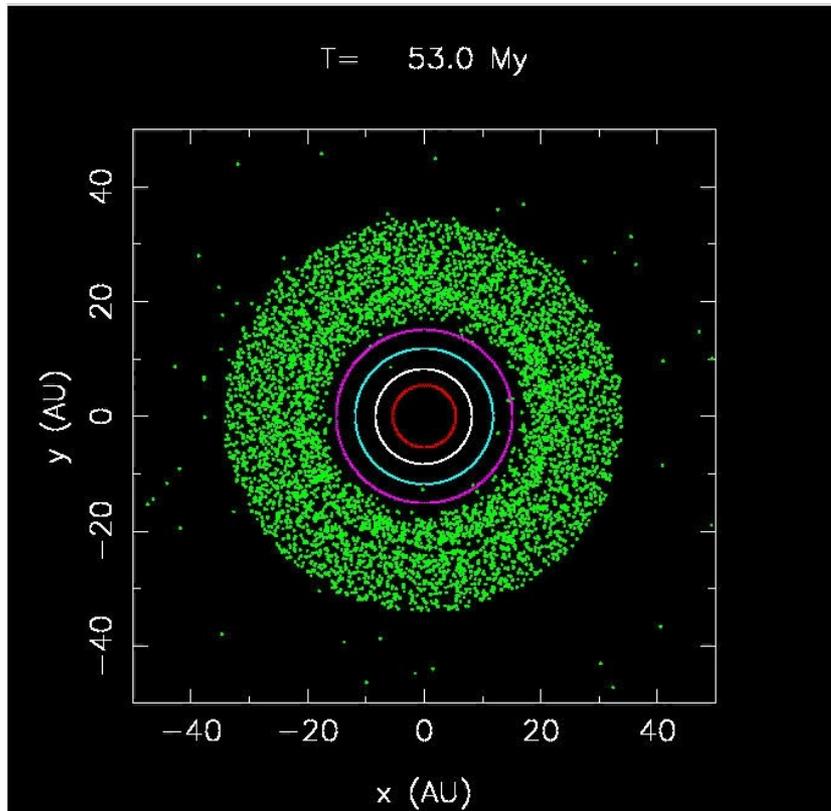
Les planètes ont accrété **tous** les solides (d'où «minimale»).

Elles se sont formées là où elles orbitent actuellement.

## 2) Modèle de Nice

Gomes et al (2005) et Tsiganis et al (2005) :

Après formation dans le disque protoplanétaire, les planètes géantes sont en orbites **circulaires**, dans une configuration **compacte**, entourée d'un disque de **planétésimaux**.



Les planétésimaux perturbent les orbites des planètes.

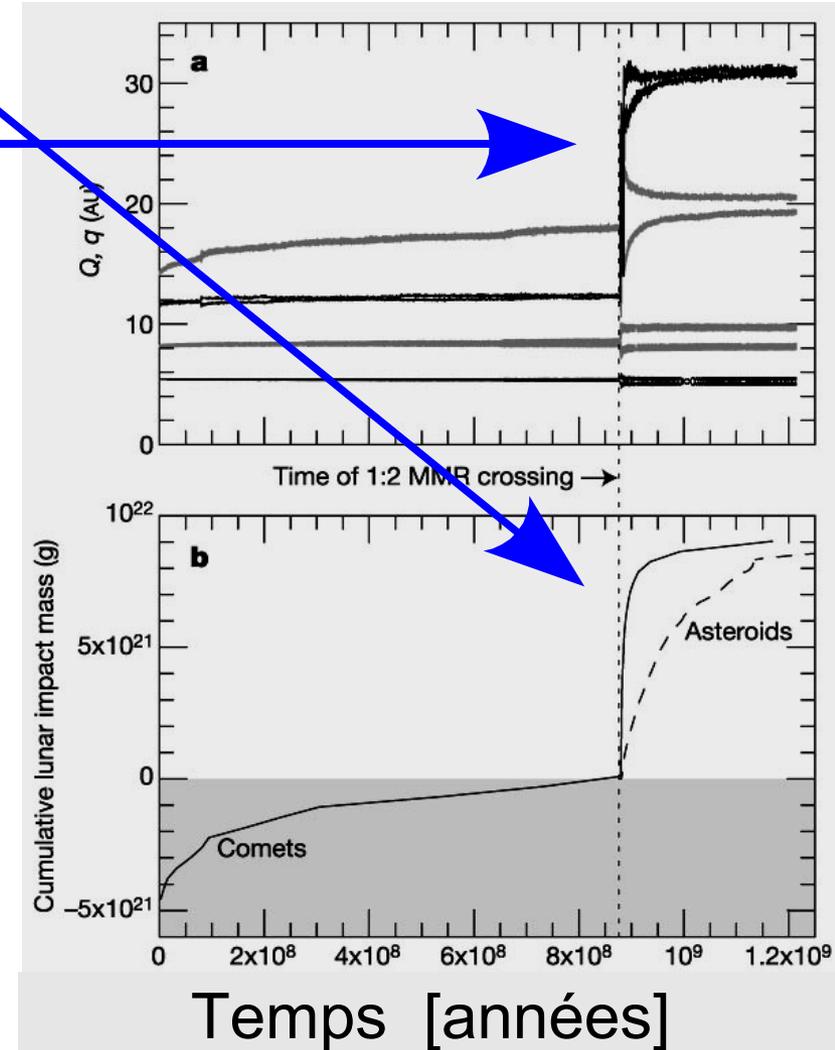
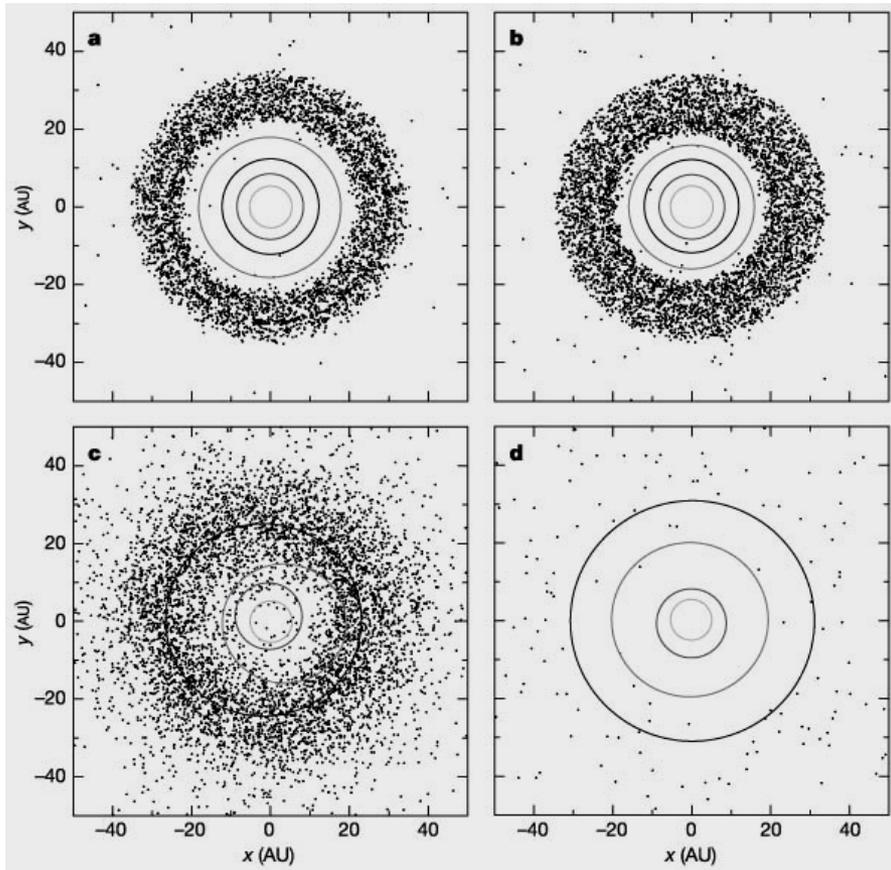
Quand Jupiter et Saturne croisent leur résonance 2:1, ça déstabilise tout le système  
→ Grand Bombardement Tardif.

Les planètes rejoignent leurs orbites actuelles.

## 2) Modèle de Nice

Ce modèle explique :

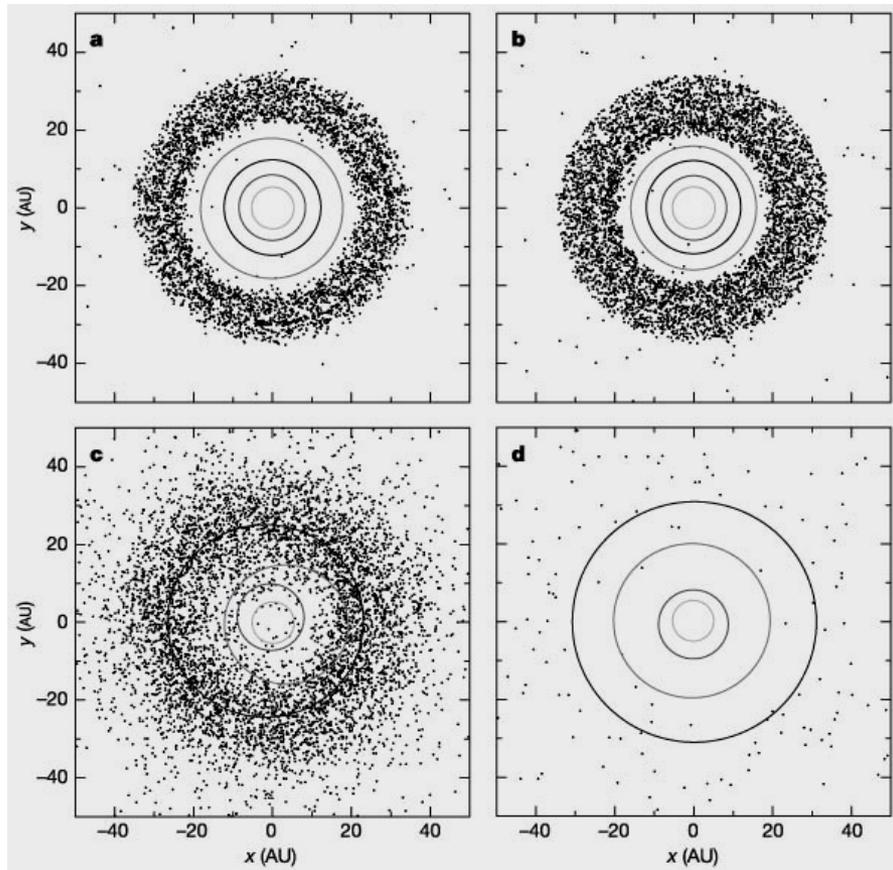
Le **Grand Bombardement Tardif**  
et les **excentricités** des géantes.



## 2) Modèle de Nice

Ce modèle explique :

Le **Grand Bombardement Tardif** et les **excentricités** des géantes.



Mais aussi :

- ✓ La capture des Troyens de Jupiter sur des orbites inclinées (Morbidelli et al, 2005).
- ✓ Les astéroïdes Hildas et de type D (Bottke et al, 2008).
- ✓ La capture de satellites irréguliers par les géantes (Nesvorny et al, 2007).
- ✓ L'architecture de la ceinture de Kuiper (Levison et al, 2007).

## 2) Modèle de Nice

Si ce modèle est vrai, les planètes ne se sont pas formées où elles sont maintenant. Elles étaient après le disque à :

Jupiter: 5,45 UA ;

Saturne: 8,18 ;

Neptune: 11-12 ;

Uranus: 14-17.

Donc la nébuleuse d'Hayashi est fausse.

Qui veut un article à 326 citations ?

# 3) Le retour de la MMSN

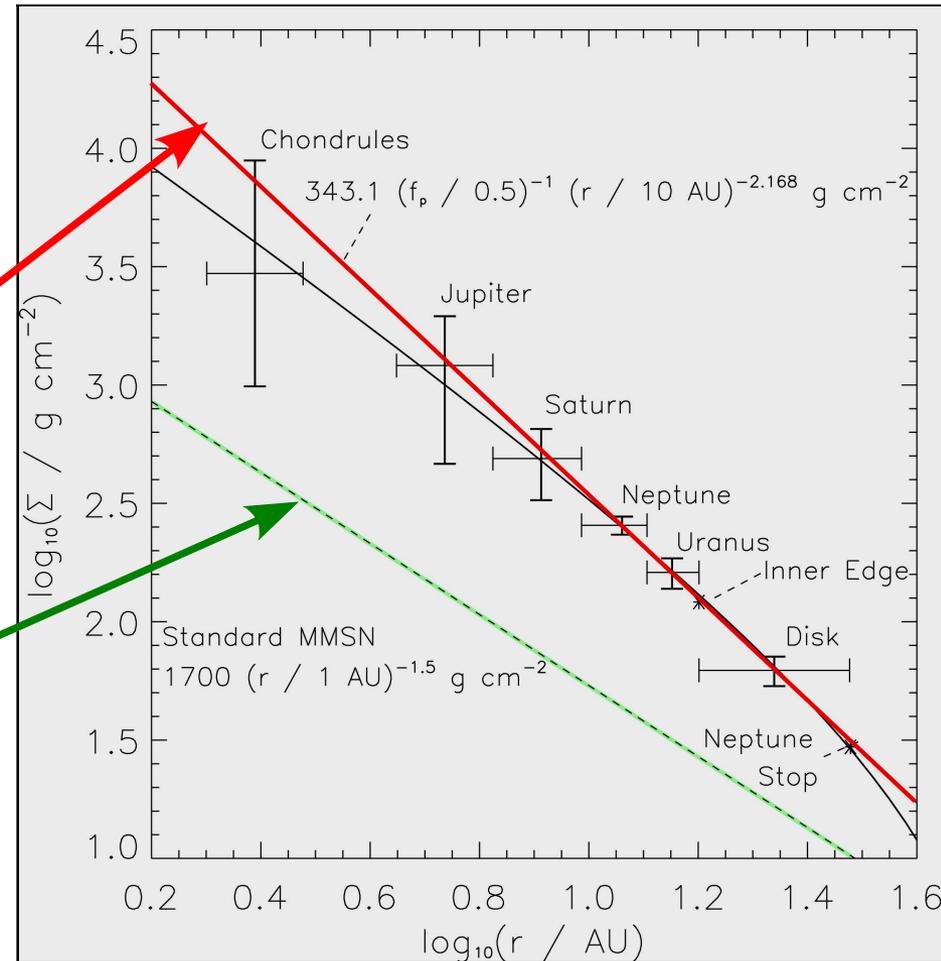
Desch (2007) : une MMSN fondée sur le modèle de Nice

- Configuration compacte,
- Uranus ↔ Neptune,
- Disque de planétésimaux,  
→ Excellent fit avec :

$$\Sigma(r) = 50500 \left( \frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-2.168} \text{ g.cm}^{-2}$$

10 fois plus dense à 5 AU que la MMSN d'Hayashi.

Pente bien plus forte.



# 3) Le retour de la MMSN

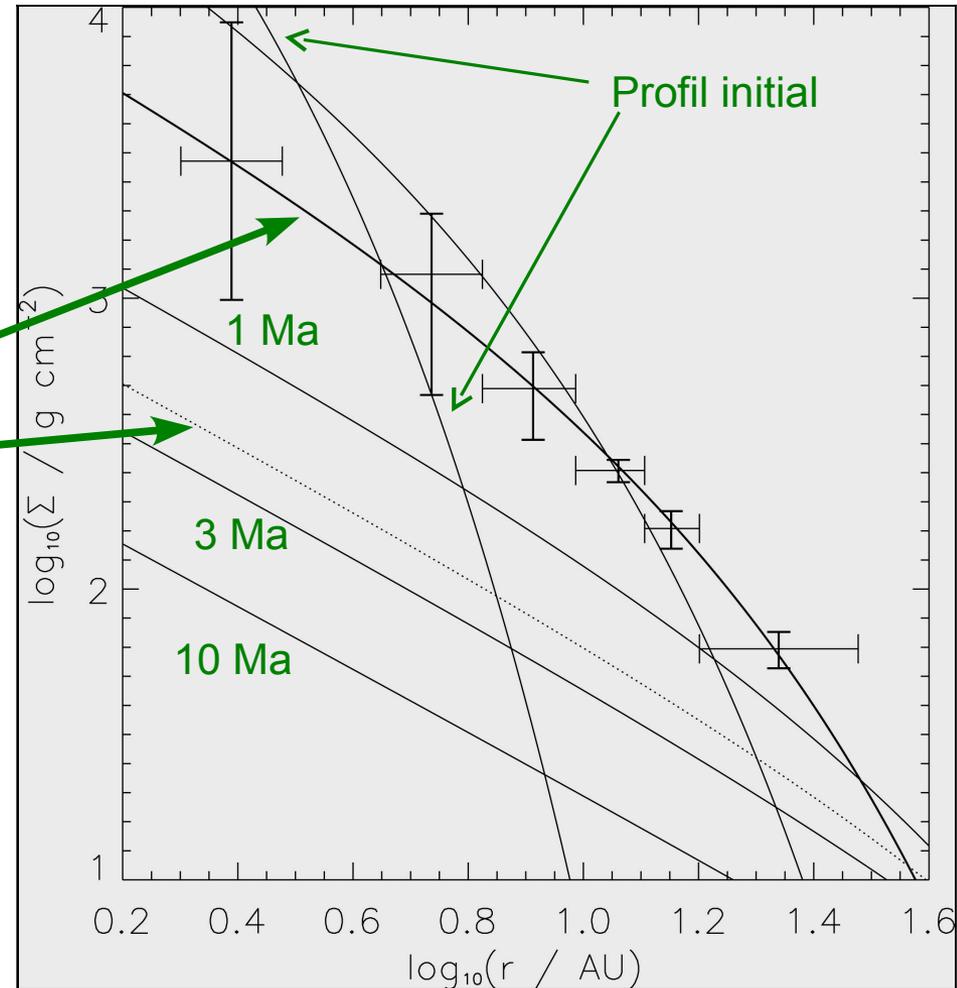
## Evolution du disque de Desch :

Disque étalé par viscosité ?

Accord avec la densité requise  
à 0.3 Myr uniquement.

Après 2 Ma,  
la densité est trop faible.

Impossible de former les  
planètes.



# 3) Le retour de la MMSN

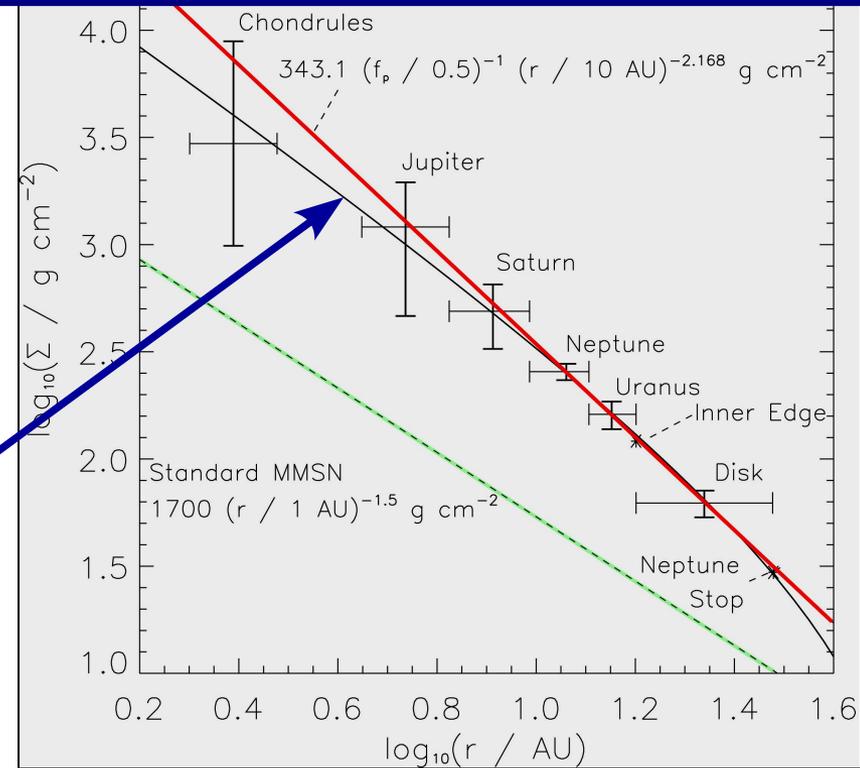
Evolution du disque de Desch :

Solution quasi-stationnaire ?

Evolution visqueuse,

+ contrainte :

$\Sigma$  et  $d\Sigma/dr$  fixés à Uranus.



$$\text{Solution : } \Sigma ( r ) = \Sigma_U / (1+x_U) * (r/r_U)^{-(2-q)} [1+x_U(r/r_U)^{1/2}]$$

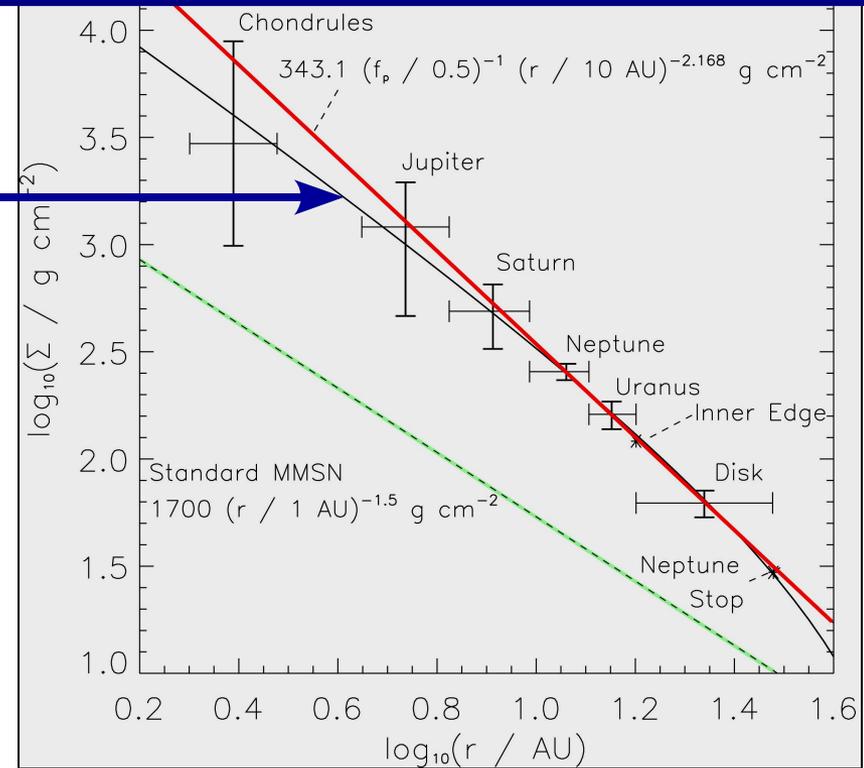
avec  $x_U < 0$ , et  $T \sim r^{-q}$ .

→ Bord externe ( $\Sigma=0$ ) à  $\sim 61$  AU.

# 3) Le retour de la MMSN

## Evolution du disque de Desch :

Ce profil dure ~10 Ma,  
alimenté par l'intérieur.



# 3) Le retour de la MMSN

Evolution du disque de Desch :

Ce profil dure  $\sim 10$  Ma,  
alimenté par l'intérieur.

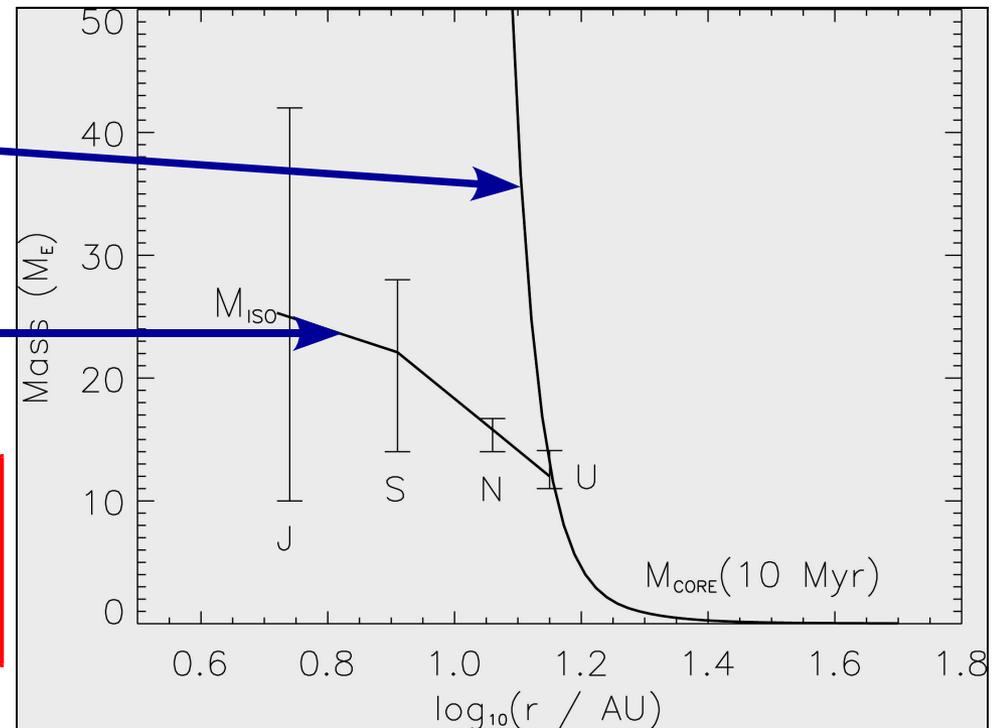
Temps pour la formation ?

Masse d'un coeur construit  
en 10 Ma :

Masse d'isolation :

✓ Masse d'isolation atteinte.

✓ Temps d'accréter le gaz.



# 4) La MIGRATION contre-attaque

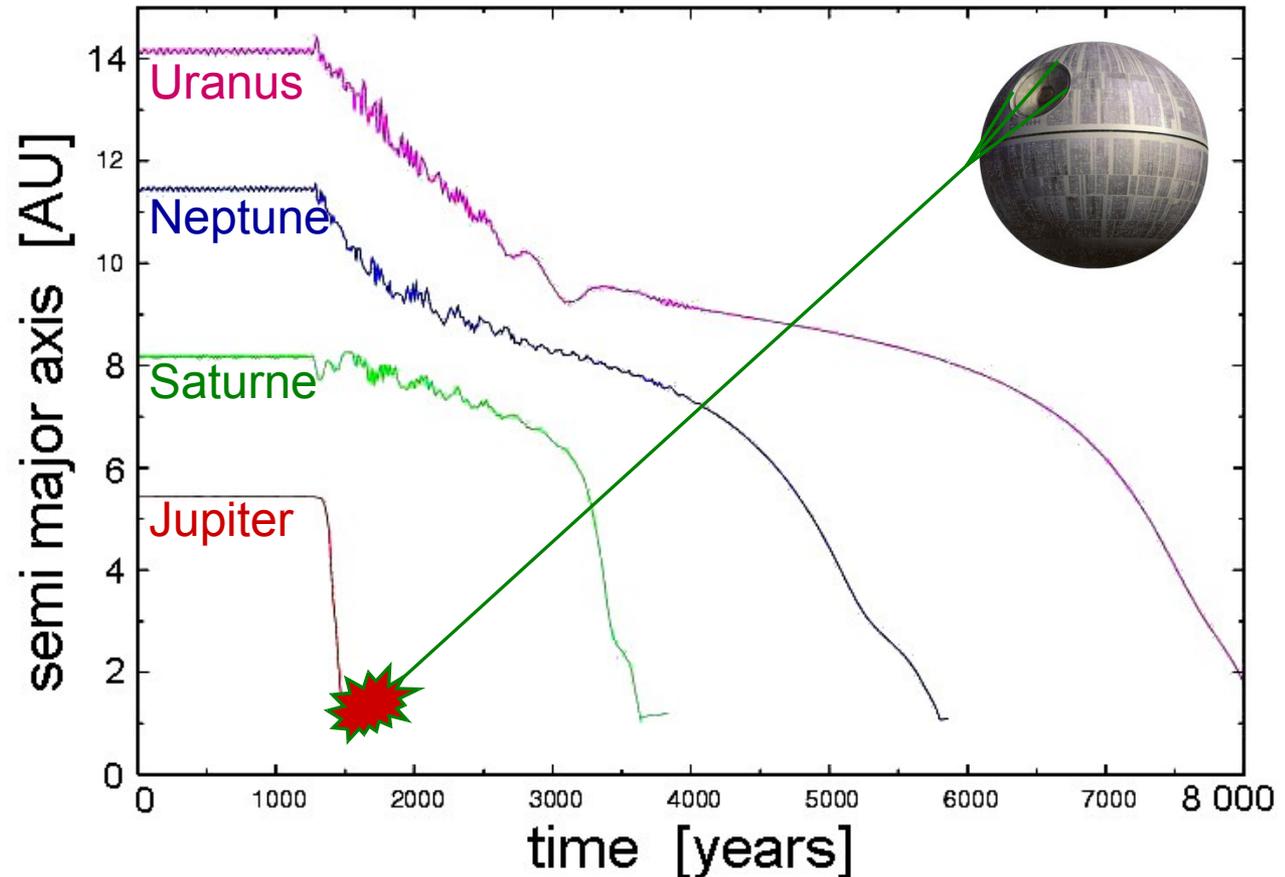
Jupiter, Saturne, Neptune & Uranus dans le disque de Desch.  
100 orbites de Jupiter sur orbite fixe, puis relâchées.

**Jupiter:** migration de type III, perdue.

**Saturne :** migr. de type I, puis III, perdue.

**Neptune :** type I, perdue.

**Uranus :** type I, perdue.



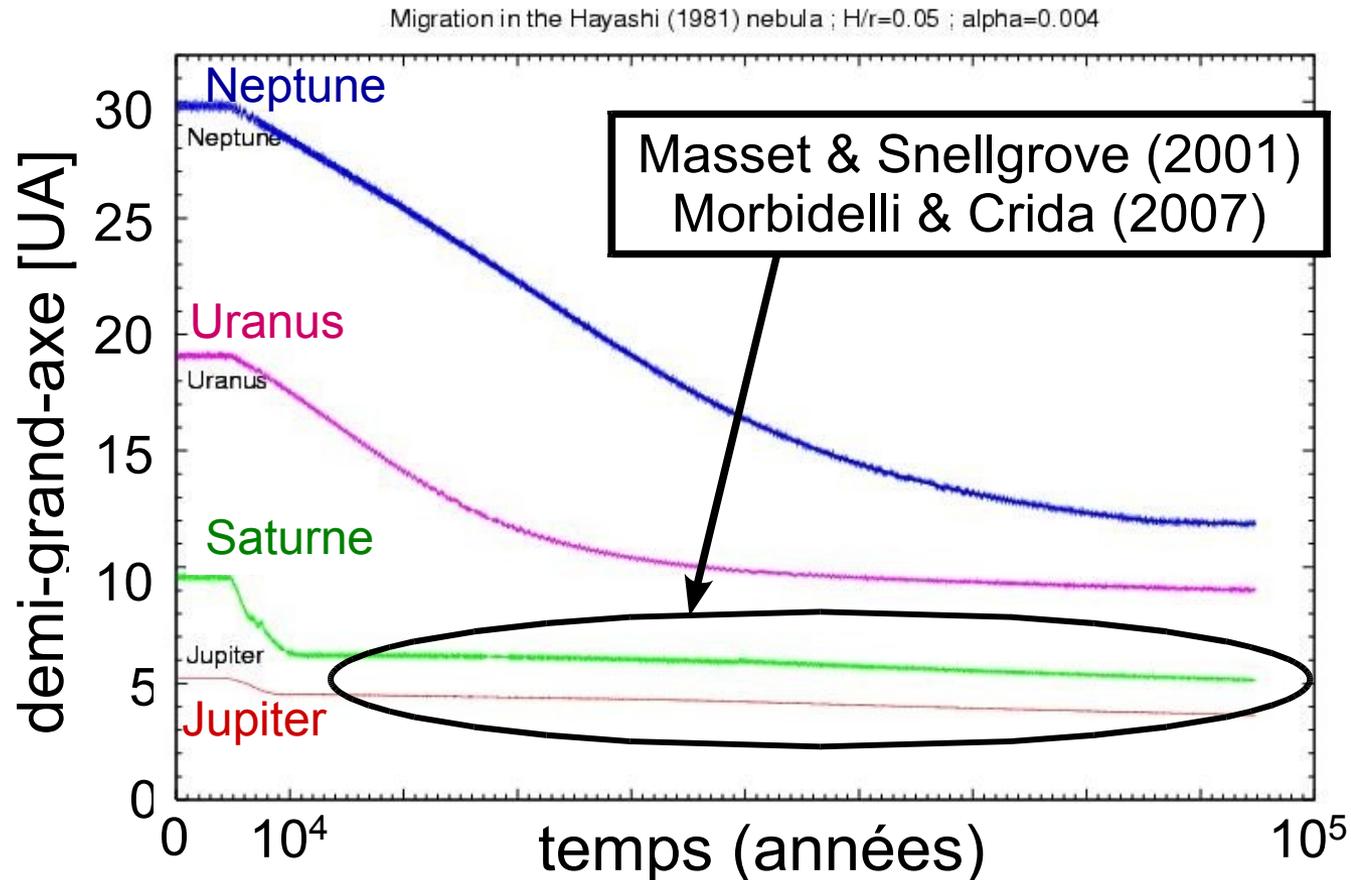
# 4) La MIGRATION contre-attaque

Jupiter, Saturne, Neptune & Uranus dans le disque d'Hayashi.  
400 orbites de Jupiter sur orbite fixe, puis relâchées.

**Jupiter-Saturne:**  
entrent en résonance, s'arrêtent.

**Neptune, Uranus,**  
capturées en résonance aussi, après type I.

( Crida, 2009, ApJ, soumis )



# 5) Un nouvel espoir

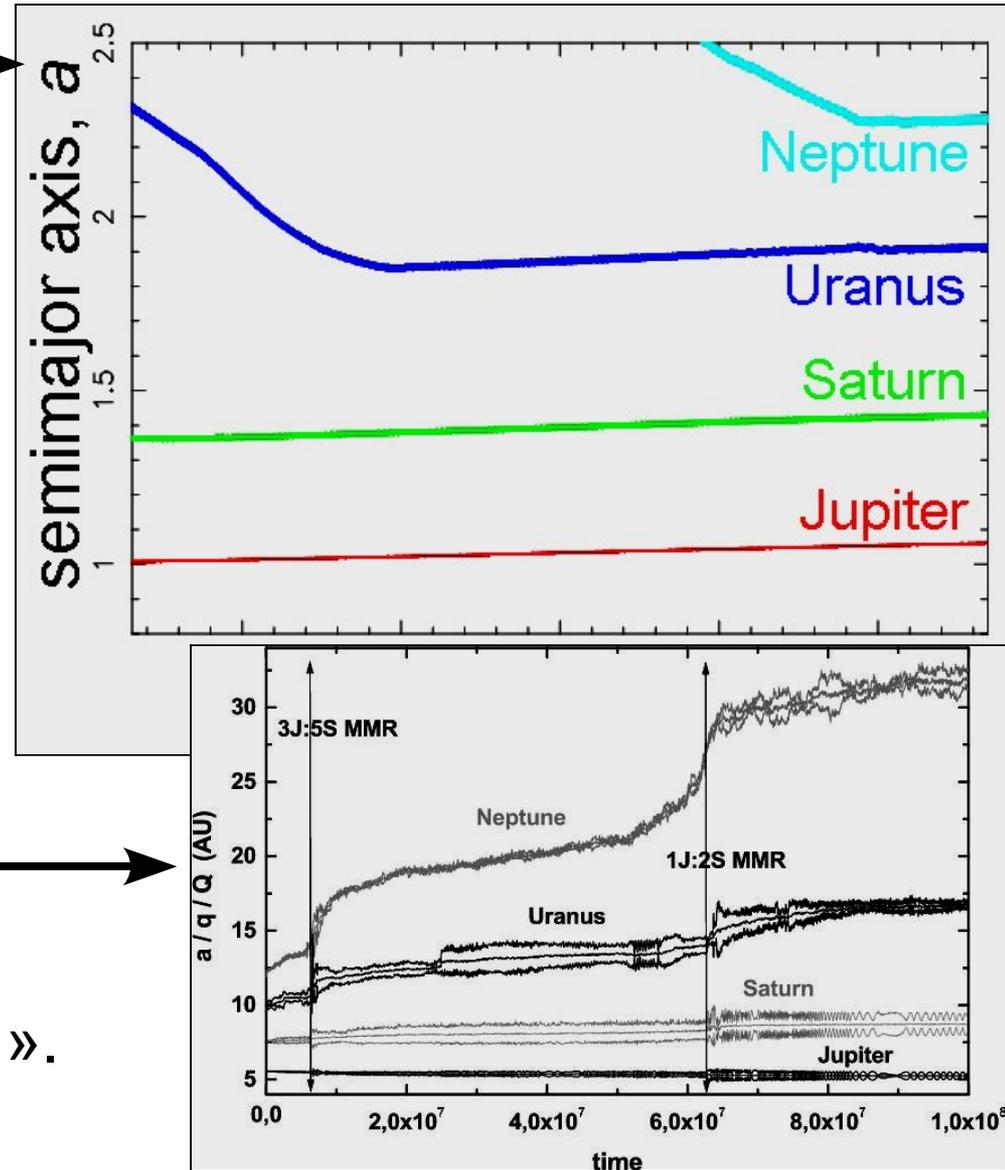
Morbidelli et al. (2007) :

6 configurations  
résonnantes possibles.

2 stables sur  $10^{8-9}$  ans  
sans disque de gaz.

Si disque de planétésimaux,  
instabilité globale,  
éventuellement tardive.

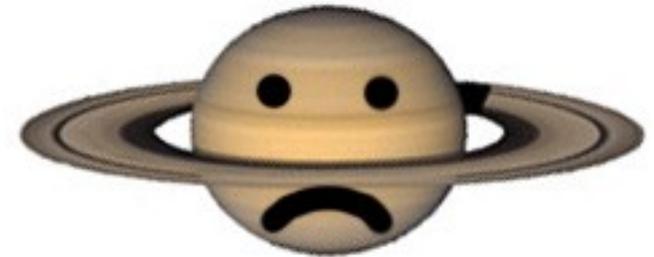
C'est le « modèle de Nice II ».



# CONCLUSION

Ni la MMSN standard (Hayashi, 1981) ni celle de Desch (2007) ne sont cohérentes avec la migration planétaire.

Dans un disque dense les géantes ne peuvent pas survivre (migration emballée de Jupiter et Saturne).



Formation des géantes sur un large intervalle radial,  
dans un disque peu dense,  
puis migration, rapprochement, et résonances,  
puis modèle de Nice (II).

La migration invalide la recette naïve de MMSN.

# PUBLICITÉ

## Overview: Solar System formation.

Une compilation par A. Crida.

Publiée par : Reviews in Modern Astronomy (vol 21).

## Inclus : Les plus grand tubes !

Âge de la Lune, Planètes Précoces, Modèle de Nice...

Libourel & Krot (2007), O'Brien et al (2006,2007), Morbidelli et al (2007), Nimmo & Agnor (2006), Pahlevan & Stevenson (2007), Touboul, Kleine, et al (2007), Bottke et al (2006,2008), et tant d'autres !

Disponible sur : <http://arxiv.org/abs/0903.3008>

Vu au  
JENAM 2008 !