



Leçon N. 5 – 20 Novembre 2024

Alessandro
MORBIDELLI

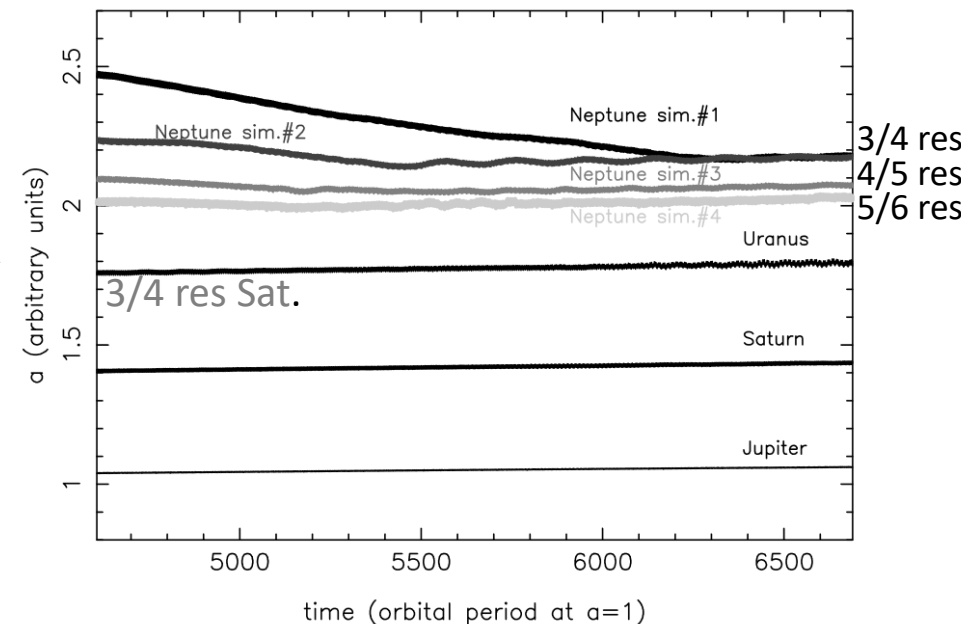
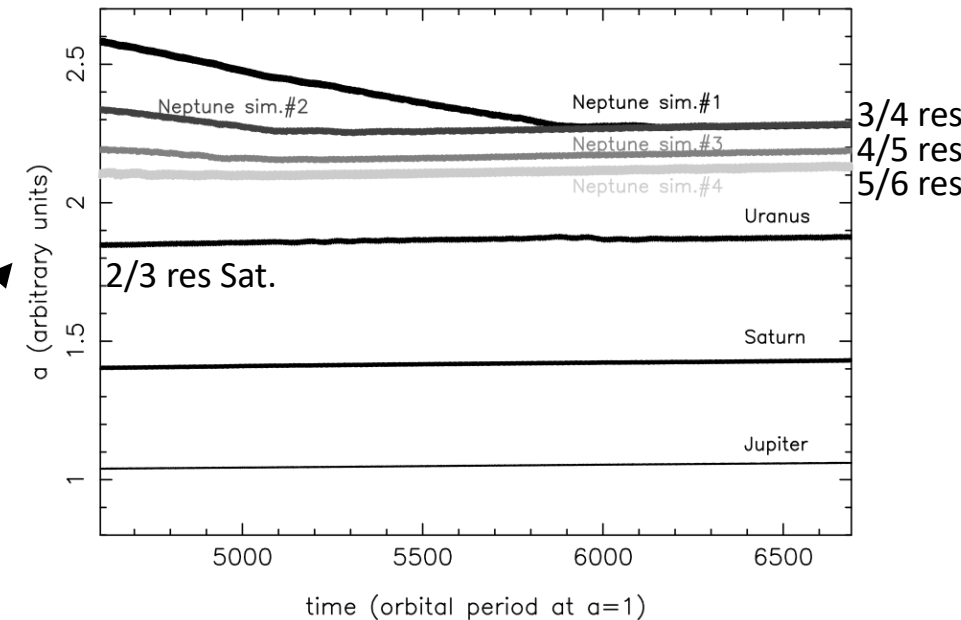
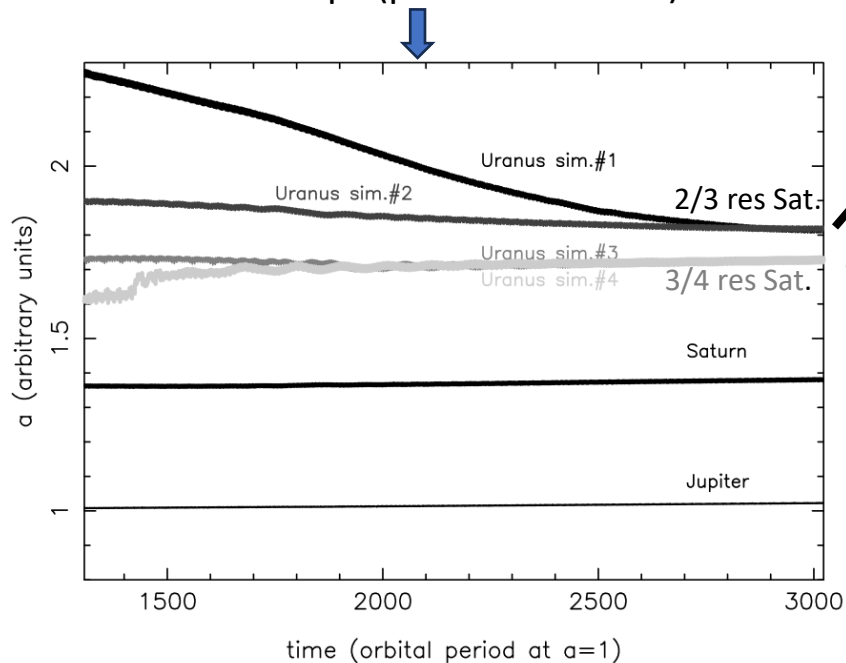
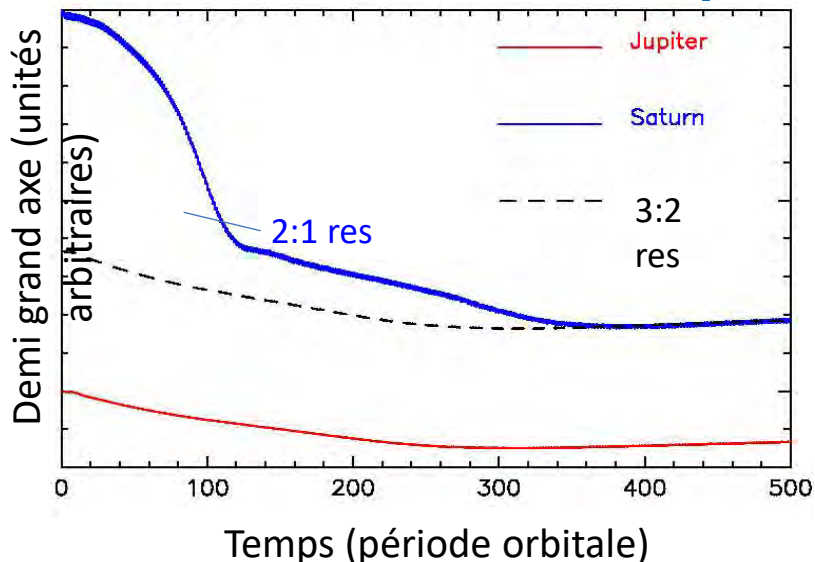
Chaire

Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

***Origine et évolution du Système solaire externe:
Le(s) nouveau(x) modèle(s) de Nice***



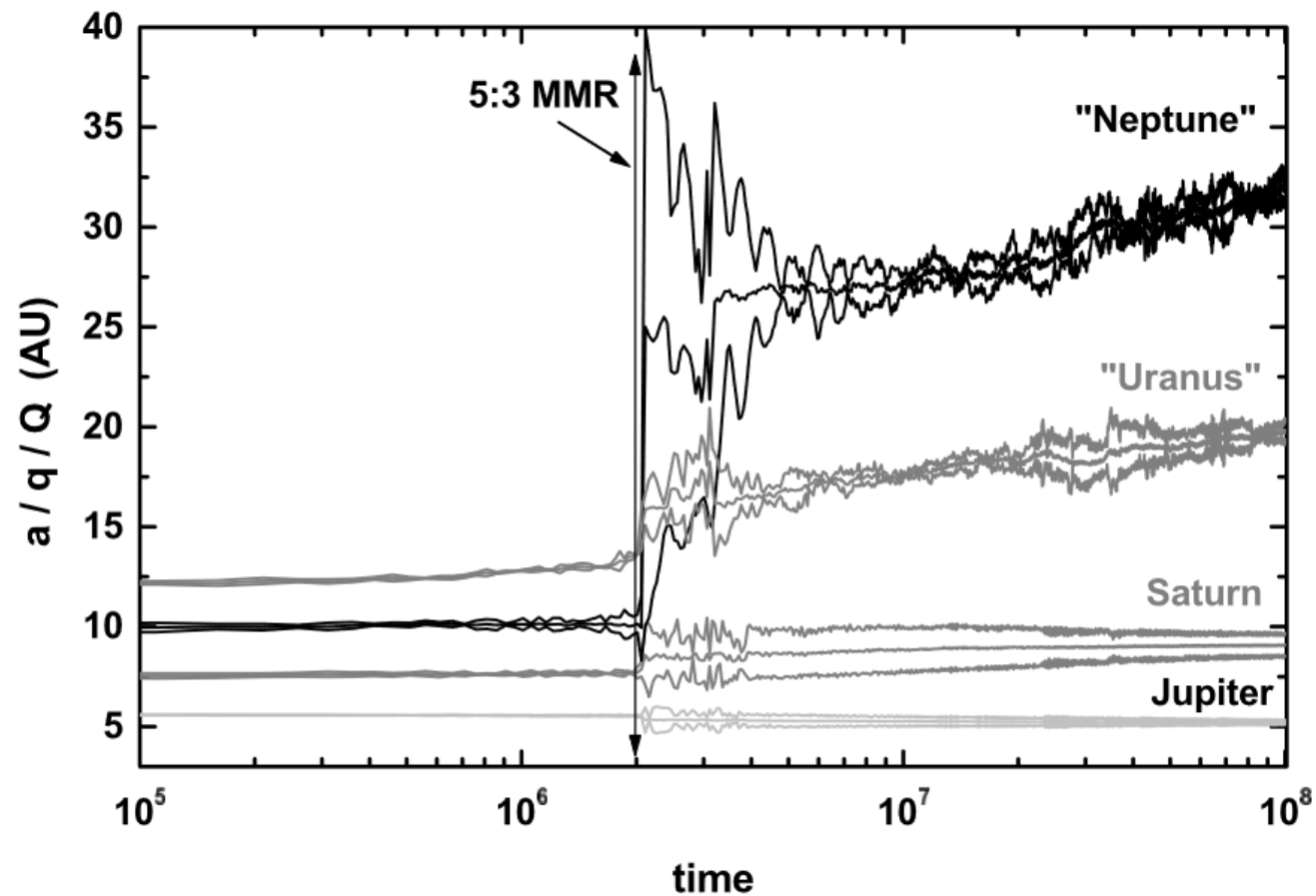
Les orbites initiales des planètes doivent être dans une chaîne de résonances



Morbideli, Tsiganis, Crida, Levison et Gomes, 2007



En partant d'une chaîne résonnante, une instabilité de type "Nice" semble possible



Morbideli, Tsiganis, Crida, Levison et Gomes, 2007



Nécessité d'une étude systématique

Paramètres à explorer:

- La chaîne de résonances initiale
- La masse du disque des planétésimaux
- La position du disque

Construction des chaînes résonnantes par migration
"synthétique": (3:2, 3:2, 4:3), (3:2, 3:2, 3:2), (3:2, 4:3, 3:2),
(3:2, 2:1, 2:1), (3:2, 2:1, 3:2), (2:1, 3:2, 3:2), (2:1, 3:2, 4:3)

Choix des masses entre 20 et 100 M_E (1,000 super-planétésimaux)

Typiquement 1 ua au-delà de la position initiale de Neptune, jusqu'à 30 ua.



Critères de succès

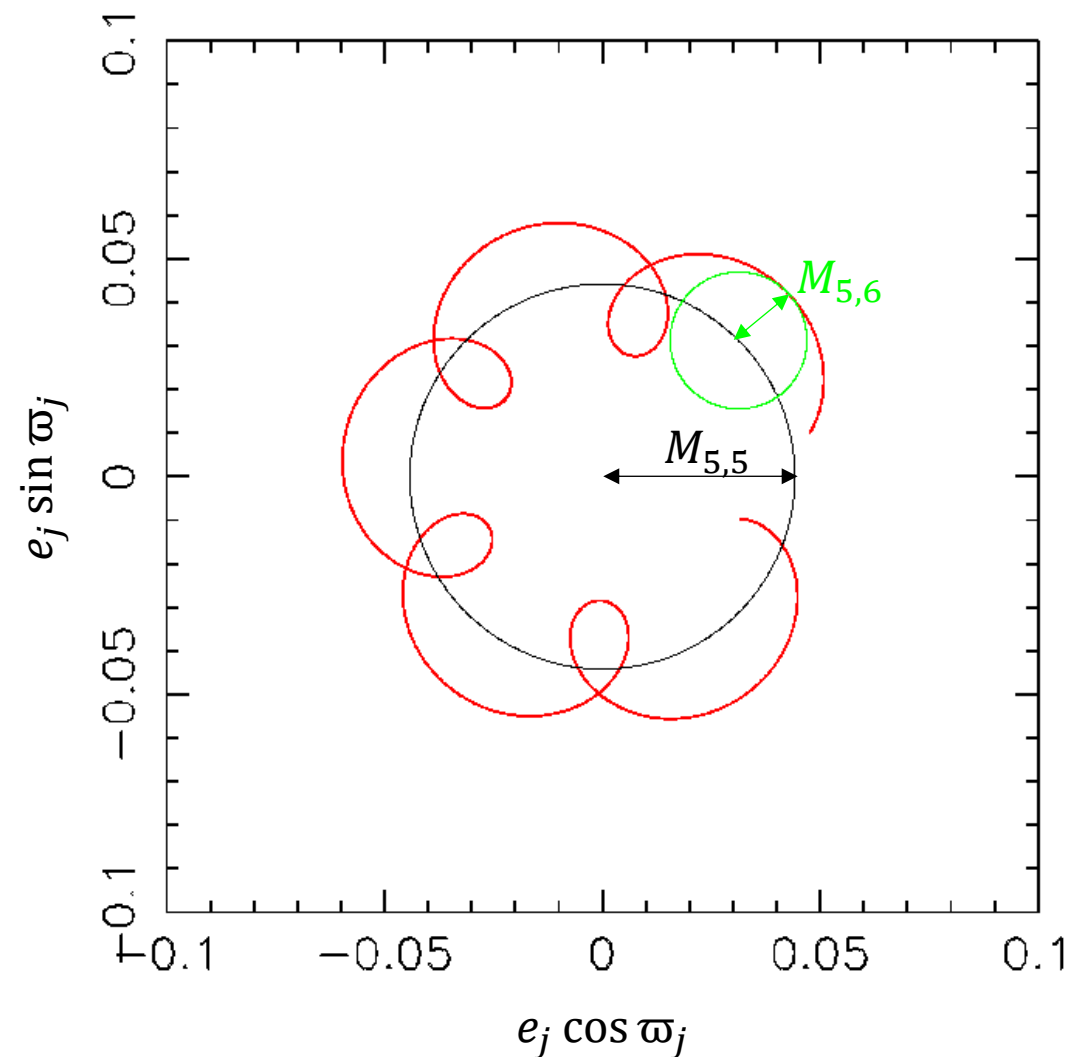
- A. 4 planètes survivent à la fin des simulations
- B. Leurs orbites sont “proches”des orbites réelles:
$$\frac{|a_{sim} - a_{réel}|}{a_{réel}} < 0.2; e < 0.11, i < 2^\circ$$
- C. Solution de Lagrange-Laplace satisfaite
- D. Changement impulsionnel du rapport P_{Sat}/P_{Jup}



Lagrange-Laplace solution

$$\begin{aligned}e_j \cos(\varpi_j) &= M_{5,5} \cos(g_5 t + \phi_5) + M_{5,6} \cos(g_6 t + \phi_6) \\e_j \sin(\varpi_j) &= M_{5,5} \sin(g_5 t + \phi_5) + M_{5,6} \sin(g_6 t + \phi_6) \\e_s \cos(\varpi_j) &= M_{6,5} \cos(g_5 t + \phi_5) + M_{6,6} \cos(g_6 t + \phi_6) \\e_s \sin(\varpi_j) &= M_{6,5} \sin(g_5 t + \phi_5) + M_{6,6} \sin(g_6 t + \phi_6)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{5,5} &= 4.4 \times 10^{-2}; & M_{5,6} &= -1.57 \times 10^{-2} \\M_{6,5} &= 3.3 \times 10^{-2}; & M_{6,6} &= 4.8 \times 10^{-2} \\g_5 &= 4.25 \text{arcsec/y}; & \phi_5 &= 30.6^\circ; & g_6 &= 28.24 \text{arcsec/y}; & \phi_6 &= 128.1^\circ\end{aligned}$$





Lagrange-Laplace solution

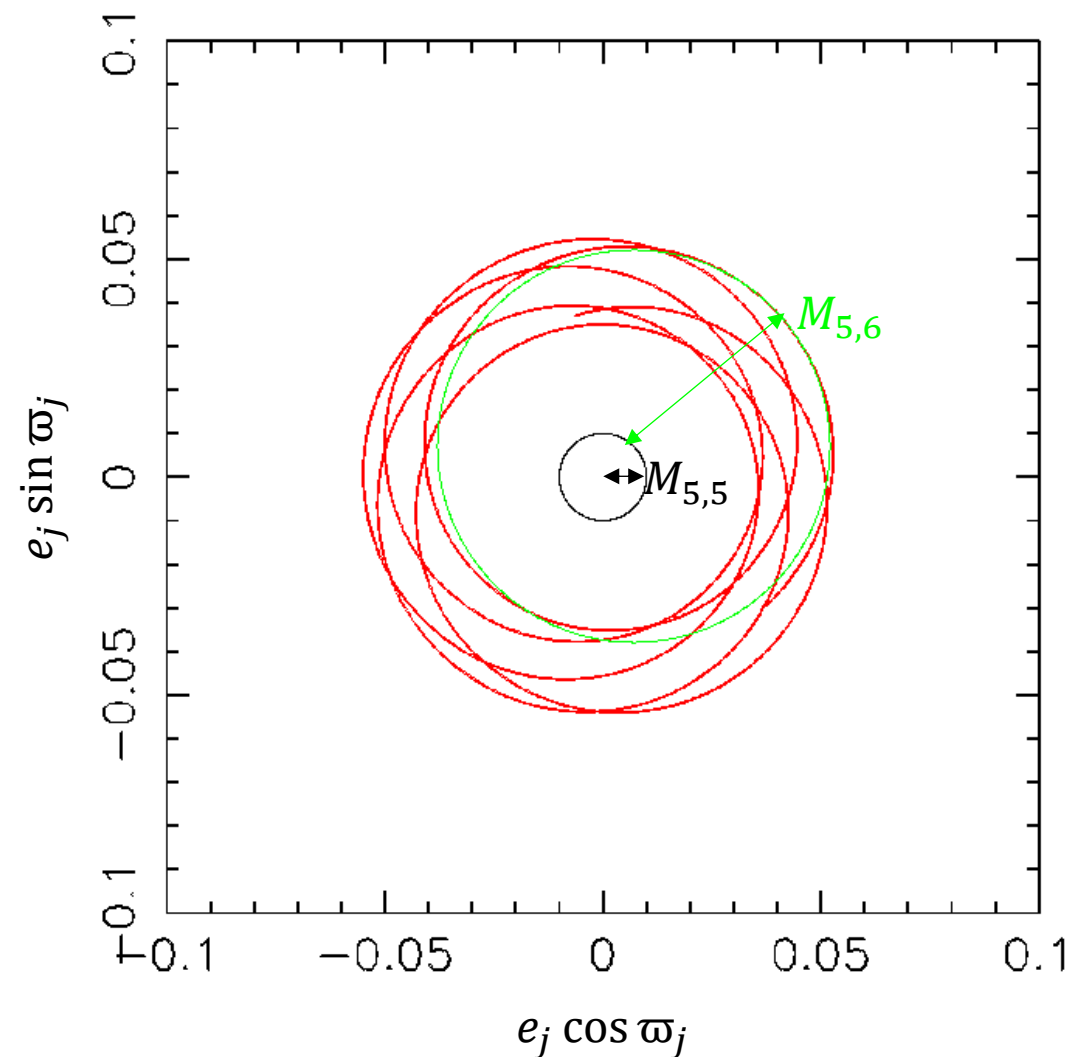
$$e_j \cos(\varpi_j) = M_{5,5} \cos(g_5 t + \phi_5) + M_{5,6} \cos(g_6 t + \phi_6)$$

$$e_j \sin(\varpi_j) = M_{5,5} \sin(g_5 t + \phi_5) + M_{5,6} \sin(g_6 t + \phi_6)$$

$$e_s \cos(\varpi_j) = M_{6,5} \cos(g_5 t + \phi_5) + M_{6,6} \cos(g_6 t + \phi_6)$$

$$e_s \sin(\varpi_j) = M_{6,5} \sin(g_5 t + \phi_5) + M_{6,6} \sin(g_6 t + \phi_6)$$

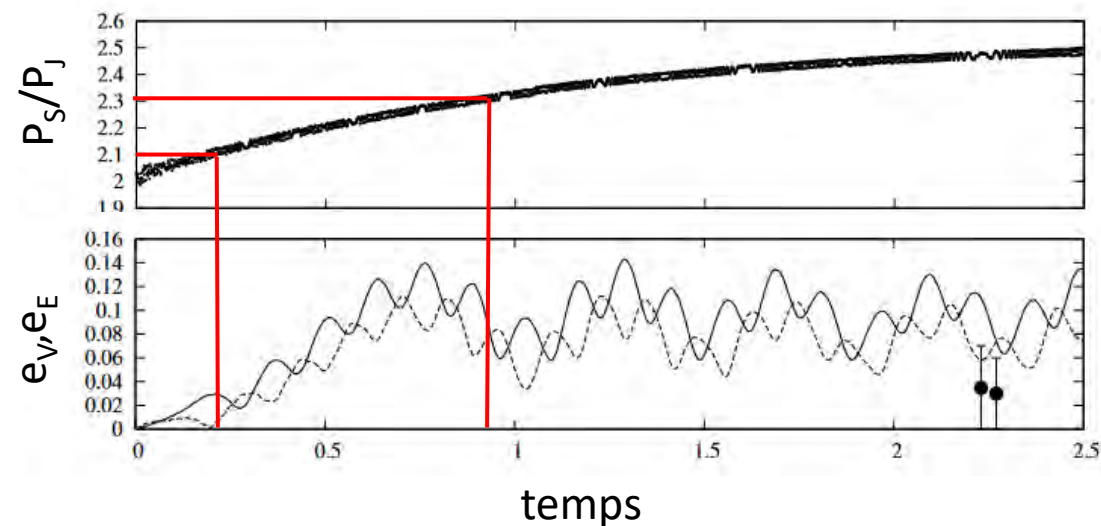
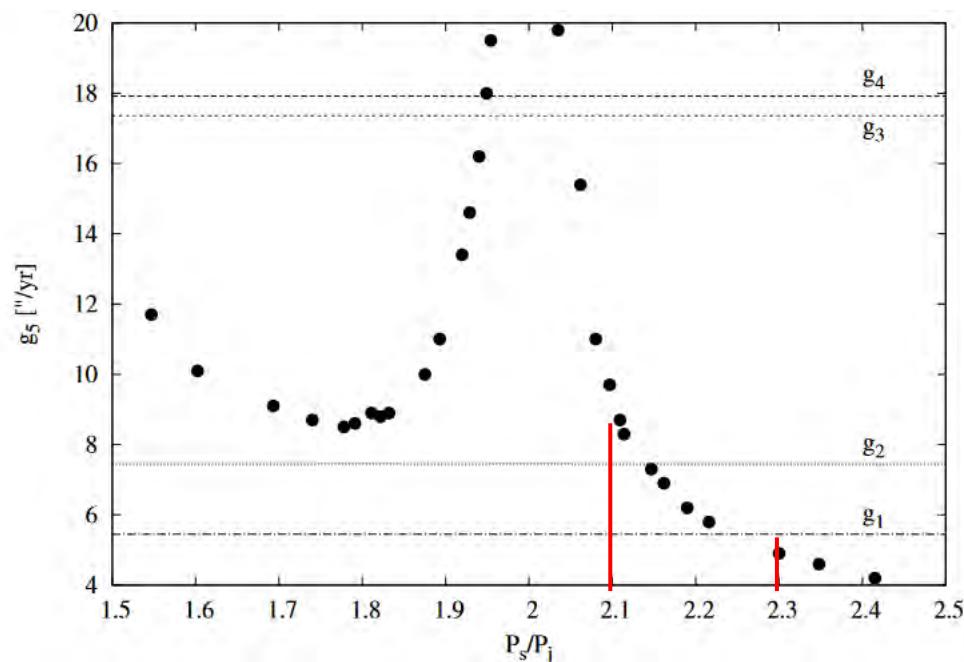
Critère C: $M_{5,5} > 0.022$





Migration de Jupiter et Saturne et évolution des planètes terrestres

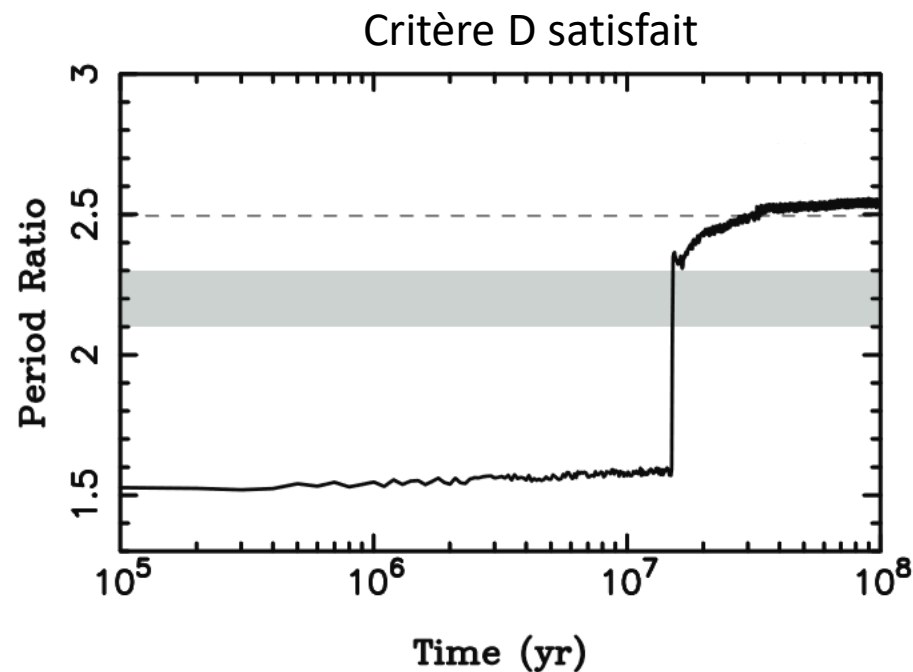
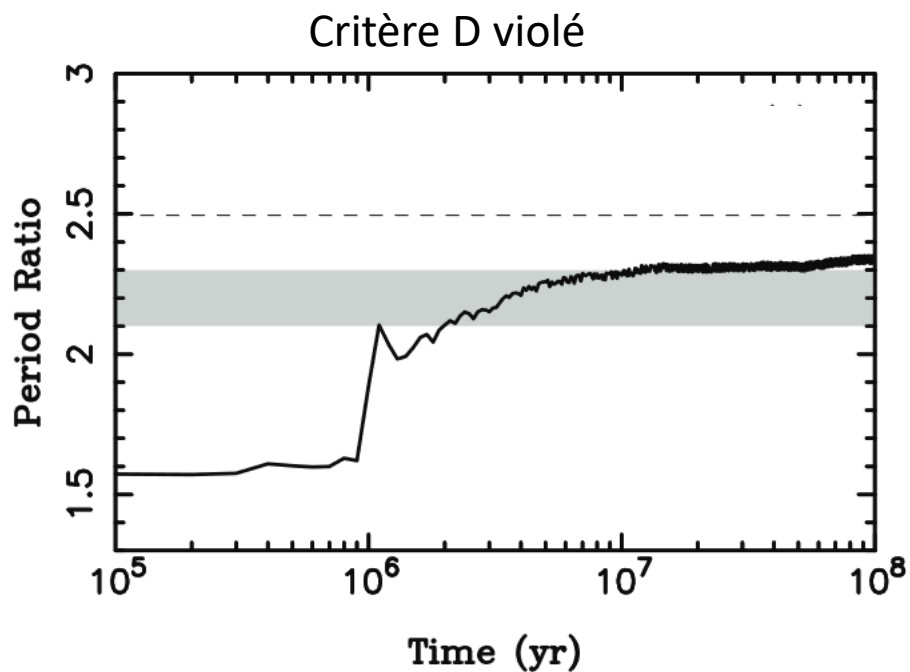
Pendant la migration divergente de Jupiter et Saturne, la fréquence g_5 (précession du périhélie de Jupiter) change et peut résonner avec les fréquences g_1, \dots, g_4 des planètes terrestres, en excitant leur excentricité au-delà des valeurs observées (Brasser et al., 2009)





Critère D:

Le rapport des périodes orbitales P_S/P_J doit évoluer très rapidement à travers de l'intervalle 2.1 – 2.3



Note:

Ce critère est essentiel si l'instabilité a lieu après la formation des planètes terrestres.

Si l'instabilité a lieu pendant la formation des planètes terrestres le critère D n'a pas lieu d'être



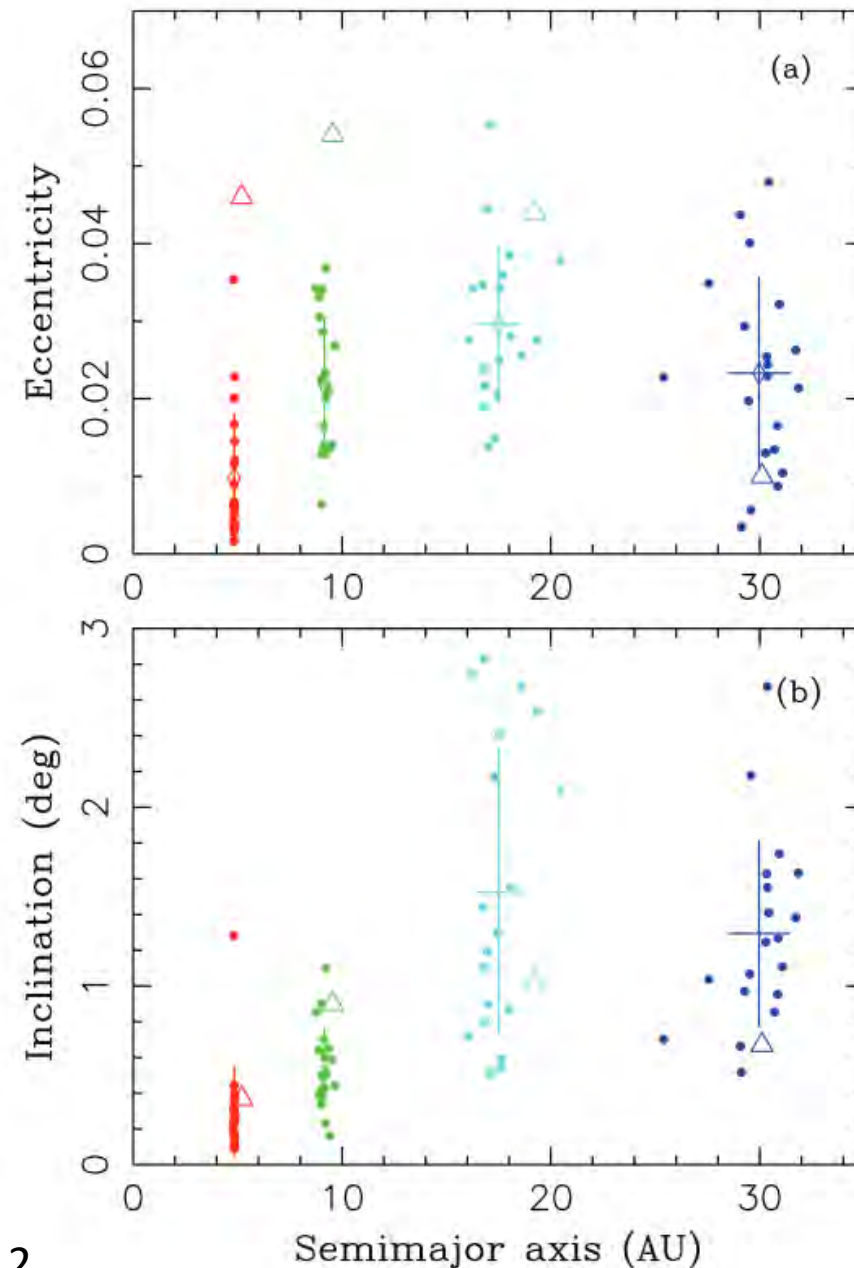
Résultats:

Beaucoup de simulations perdent une planète (Uranus ou Neptune). Critère A non satisfait.

Les simulations qui ne perdent pas des planètes, en général produisent des orbites de Jupiter et Saturne qui ne sont pas suffisamment excentriques et inclinées. Critère B rarement satisfait. Critère C presque jamais satisfait

La raison est que, pour ne pas perdre une planète, l'instabilité doit être peu violente et le disque de planétésimaux massif -> forte friction dynamique, petite excitation orbitale finale des planètes

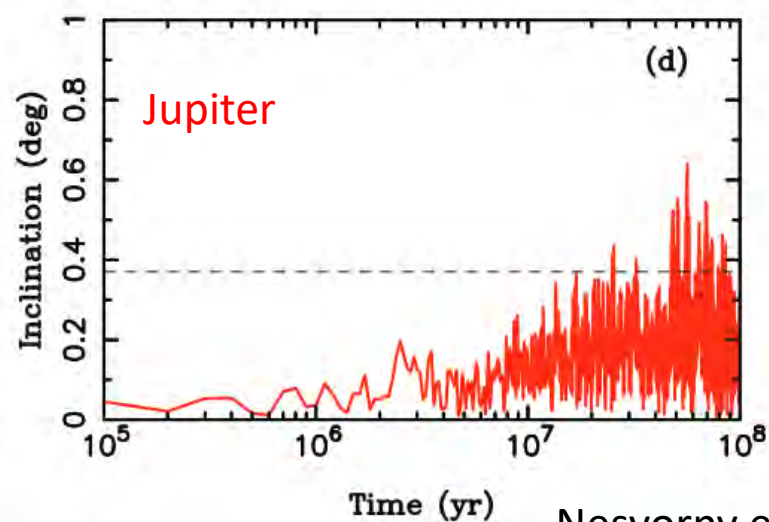
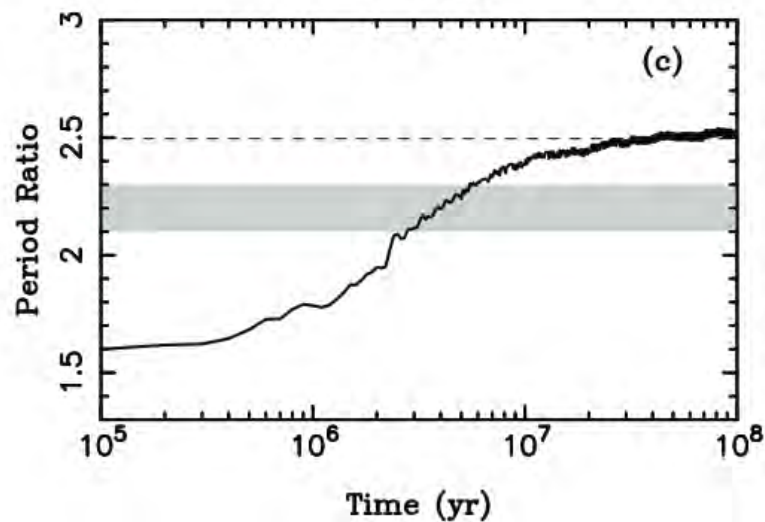
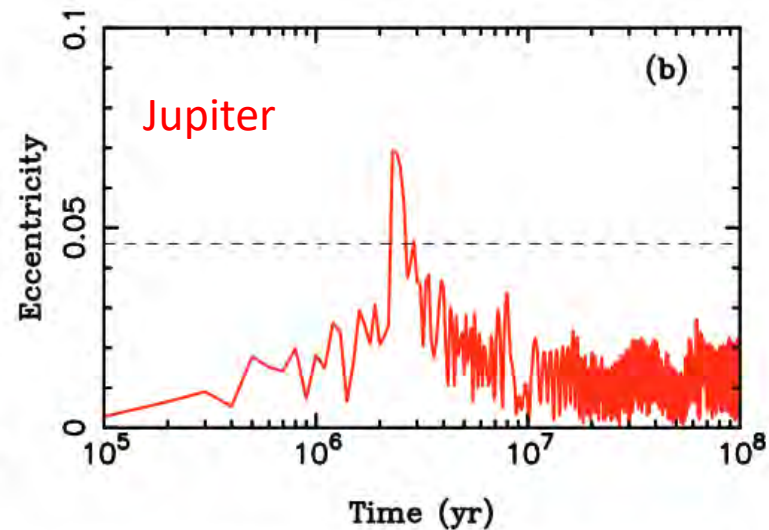
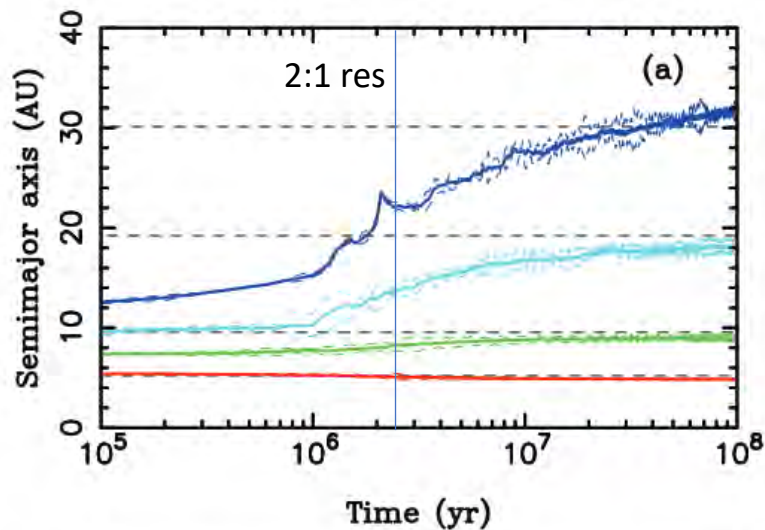
(3:2, 3:2, 4:3), $M_{\text{disk}} = 75 M_E$





Exemple d'évolution à 4 planètes:

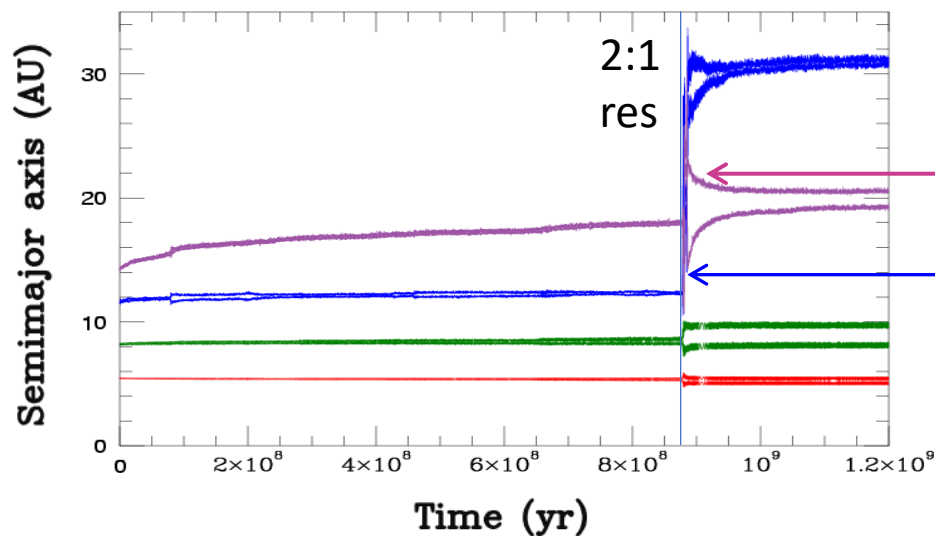
(3:2, 3:2, 4:3), $M_{\text{disk}} = 75 M_E$



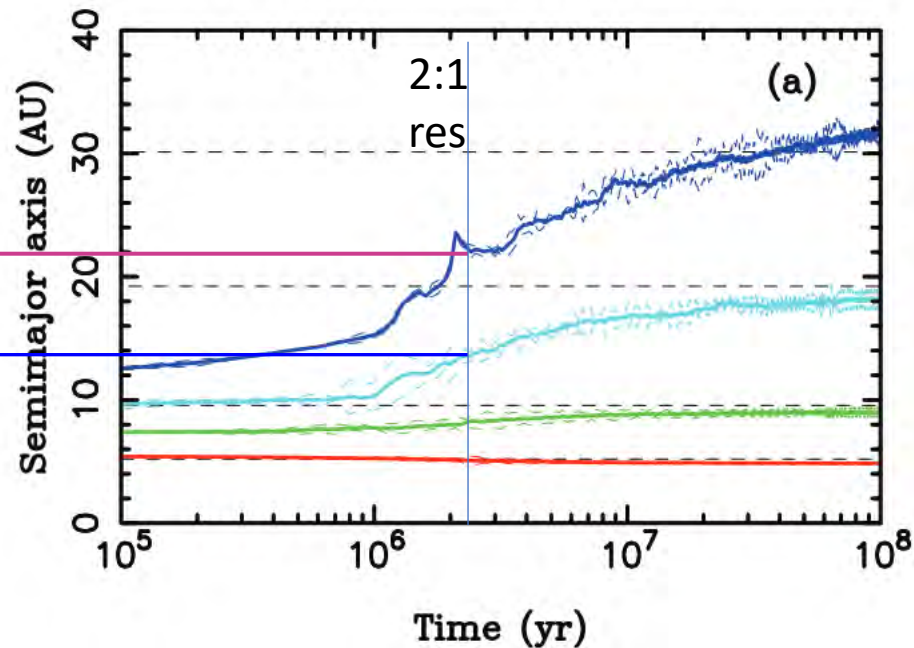


Comparaison avec Nice 1.0

Modèle original



Nouveau modèle



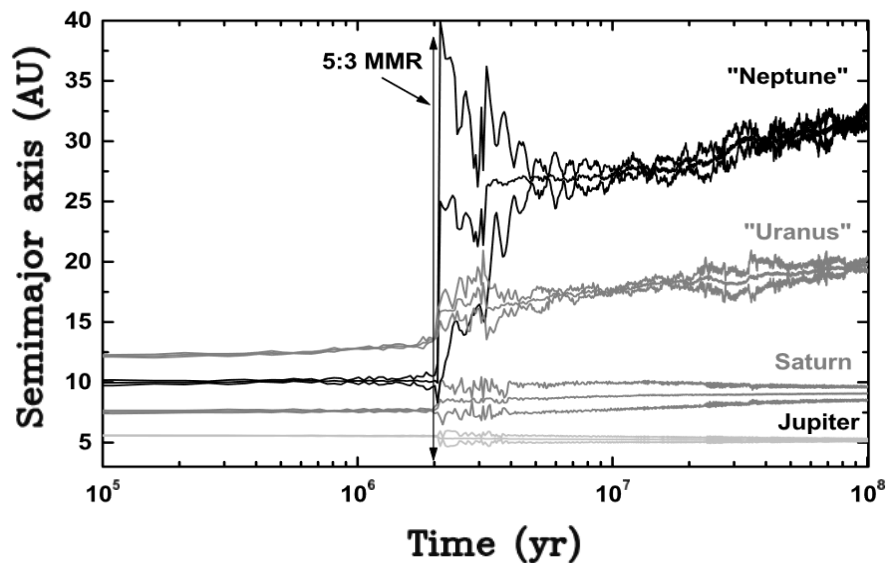
Dans le nouveau modèle, quand Jupiter et Saturne traversent la résonance 2:1, Uranus et Neptune sont trop loins pour engendrer une instabilité forte.

Le disque de planétésimaux est aussi plus massif pour amener les planètes à la bonne distance, ce qui amortit davantage les instabilités.

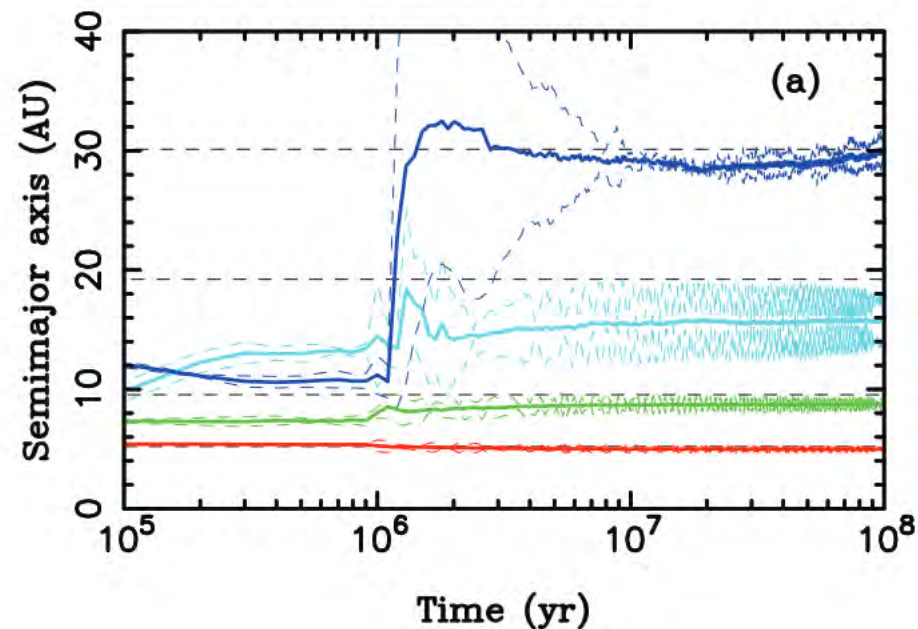


Comparaison avec Nice 1.0

Morbidelli et al., 2007



Nesvorny et Morbidelli, 2012



Dans des disques de planétésimaux plus légers ($\sim 50 M_E$) l'instabilité peut avoir lieu quand Jupiter et Saturne traversent des résonances intermédiaires (ex. 5:3), mais dans la plupart de cas on perd une planète.

Quatre planètes survivent seulement dans 20-30% de cas, et le critère C est satisfait seulement dans 1% de cas.



Le modèle de Nice à cinq planètes

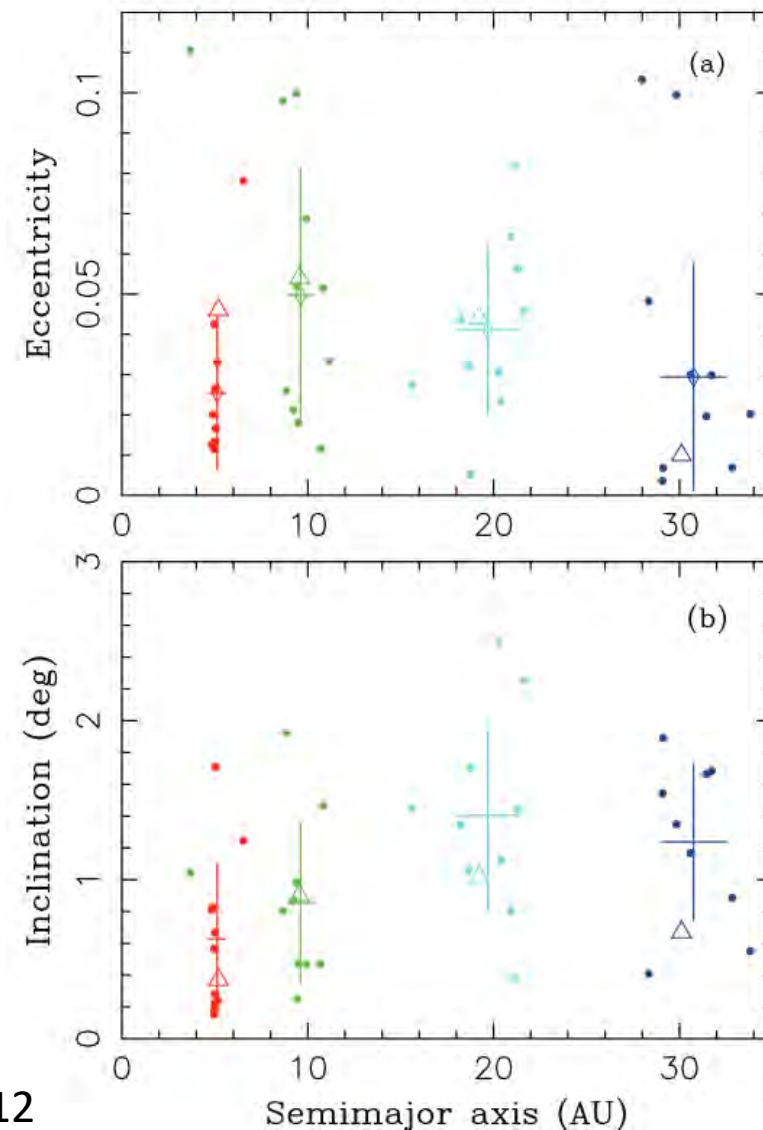
Pour pallier ces problèmes, on introduit une 5ème planète de masse comparable à Uranus et Neptune.

L'instabilité peut être plus violente car on peut (doit) perdre une planète ce qui donne des plus fortes excitations orbitales aux planètes restantes.

L'idée d'une 5ème planète fût d'abord introduite par Batygin et Brown (2010)

On considère les chaînes résonnantes à 5 planètes suivantes:
(3:2, 3:2, 4:3, 5:4), (3:2, 3:2, 3:2, 3:2), (3:2, 3:2, 4:3, 4:3), (3:2, 3:2, 2:1, 3:2), (3:2, 3:2, 2:1, 2:1), **(2:1, 3:2, 3:2, 3:2)**, **(2:1, 4:3, 3:2, 3:2)**

(3:2, 3:2, 4:3, 5:4), $M_{\text{disk}} = 50 M_E$

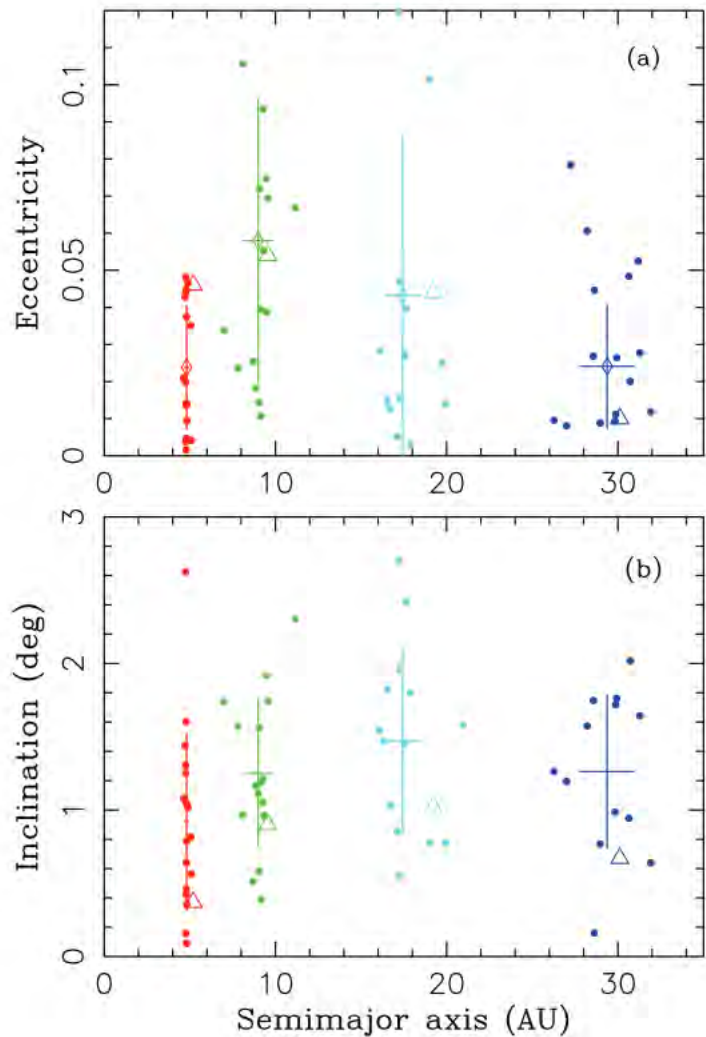


Nesvorny et Morbidelli, 2012



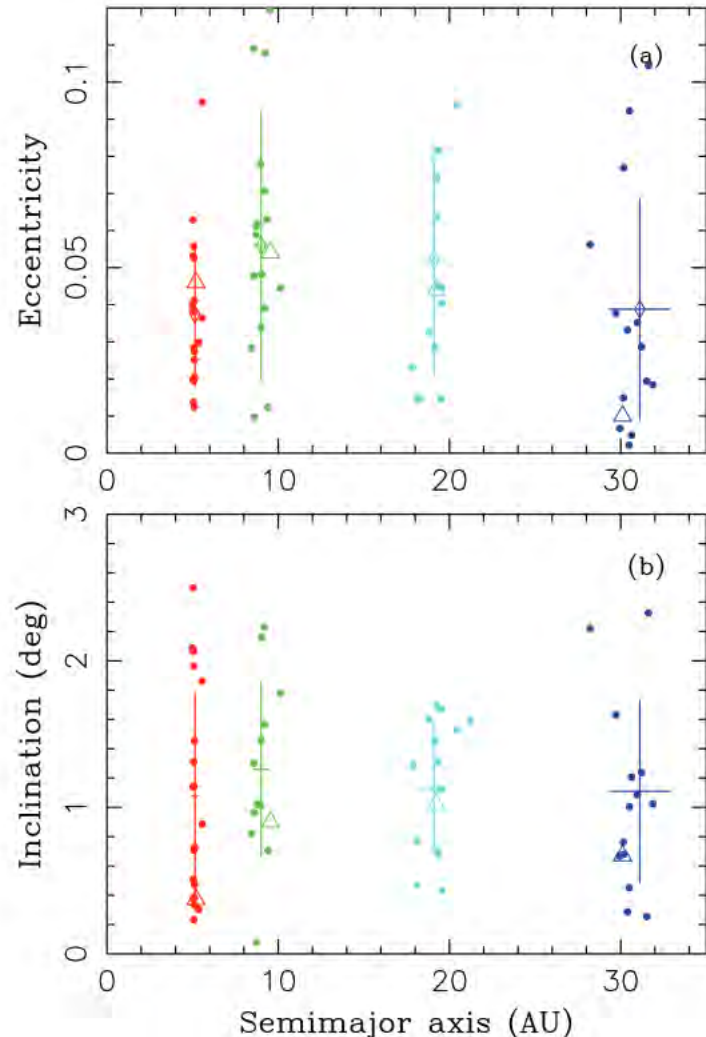
Le modèle de Nice à cinq planètes

(3:2, 3:2, 3:2, 3:2), $M_{\text{disk}} = 35 M_E$



A (%)	B (%)	C (%)	D (%)
33	16	4	8

(3:2, 3:2, 2:1, 3:2), $M_{\text{disk}} = 20 M_E$

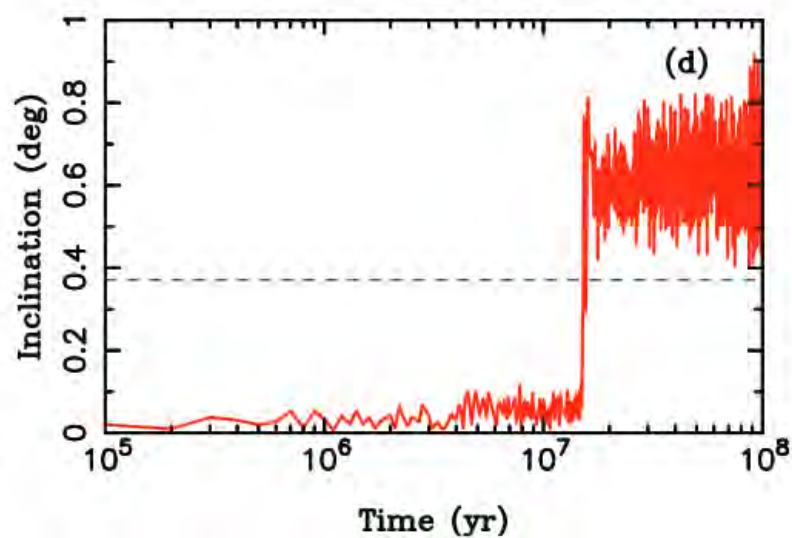
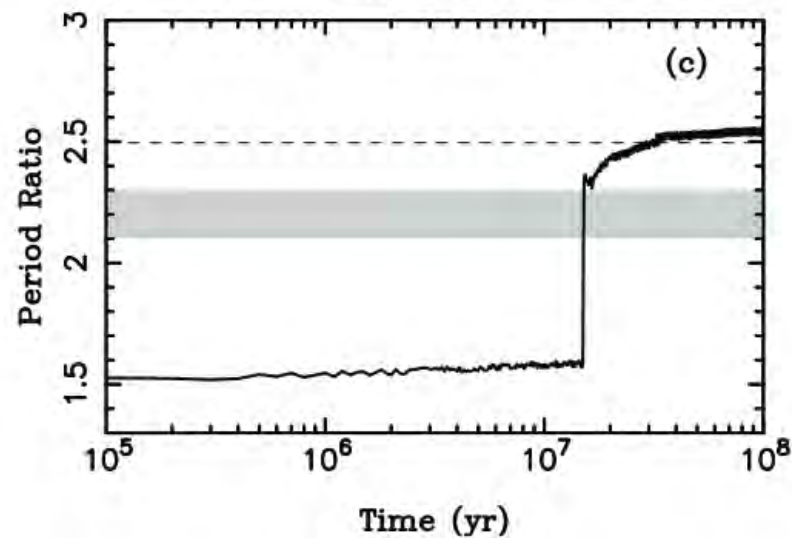
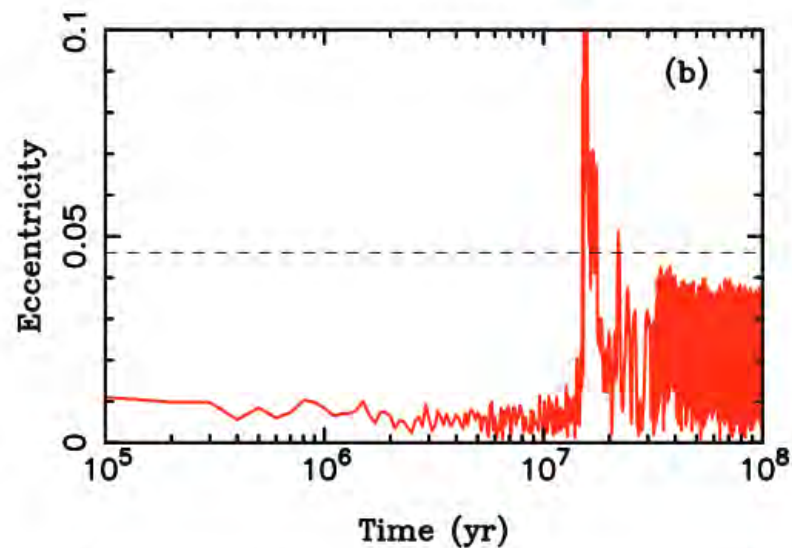
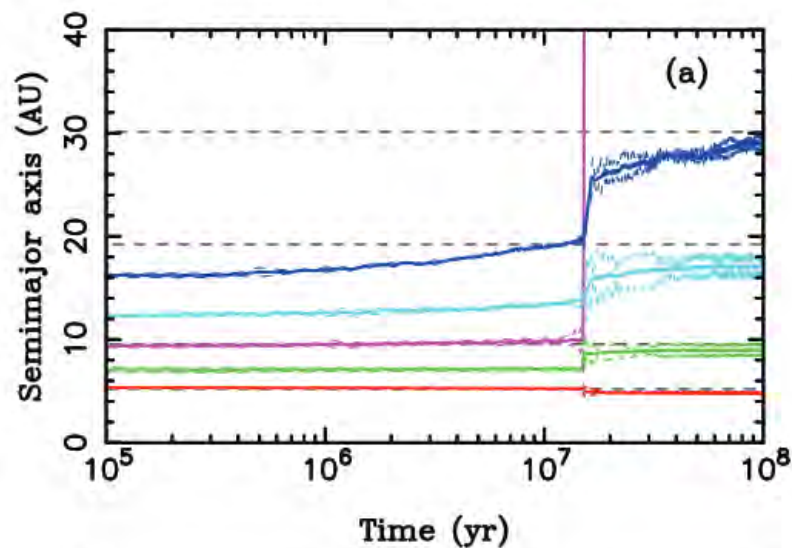


A (%)	B (%)	C (%)	D (%)
30	10	7	7



Exemple d'évolution à cinq planètes

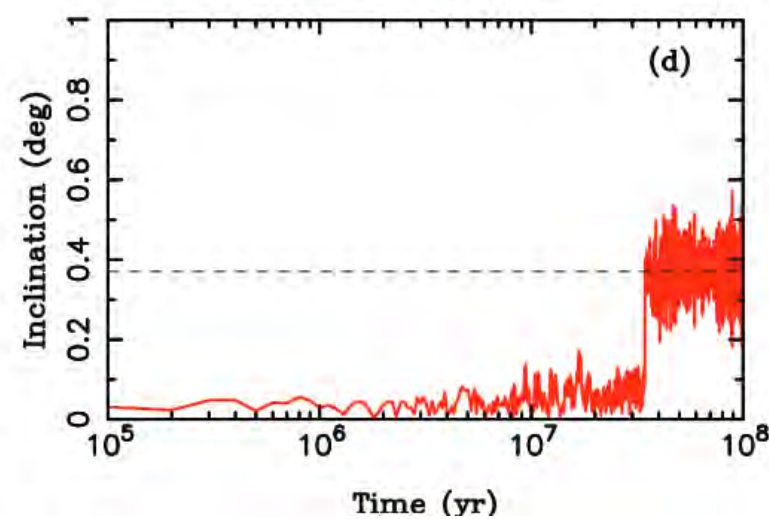
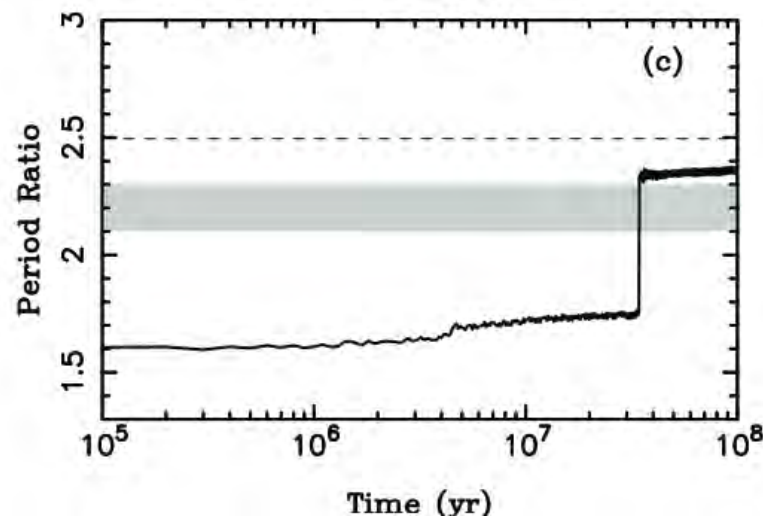
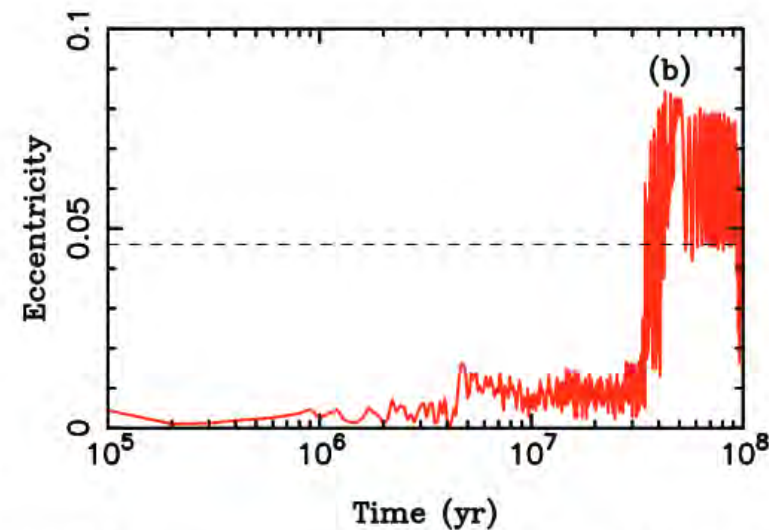
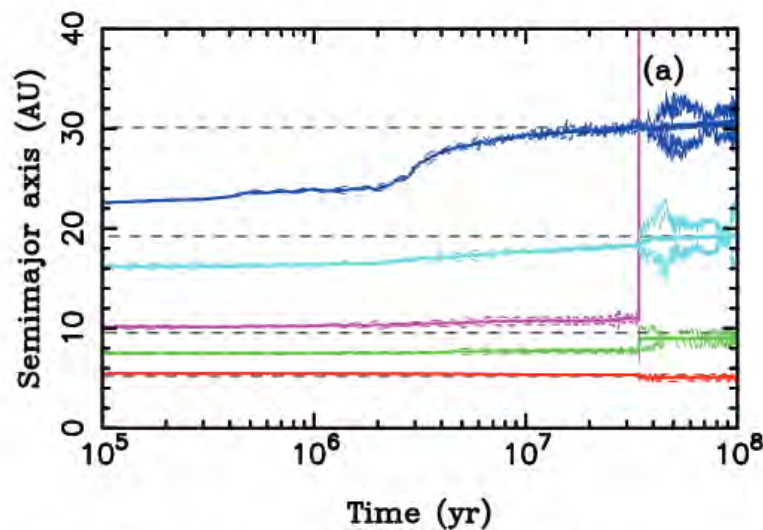
(3:2, 3:2, 3:2, 3:2), $M_{\text{disk}} = 35 M_E$





Exemple d'évolution à cinq planètes

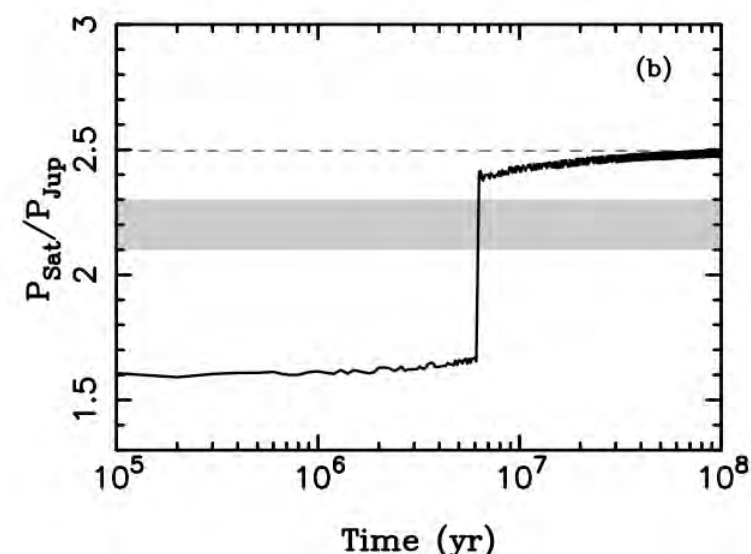
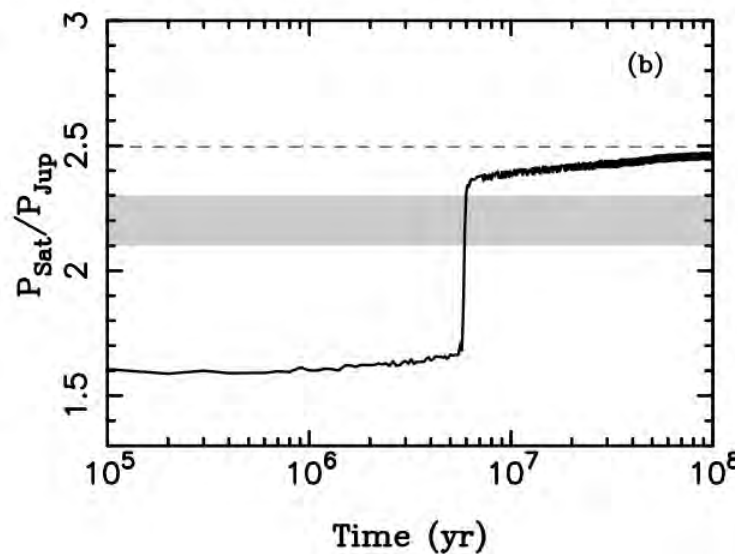
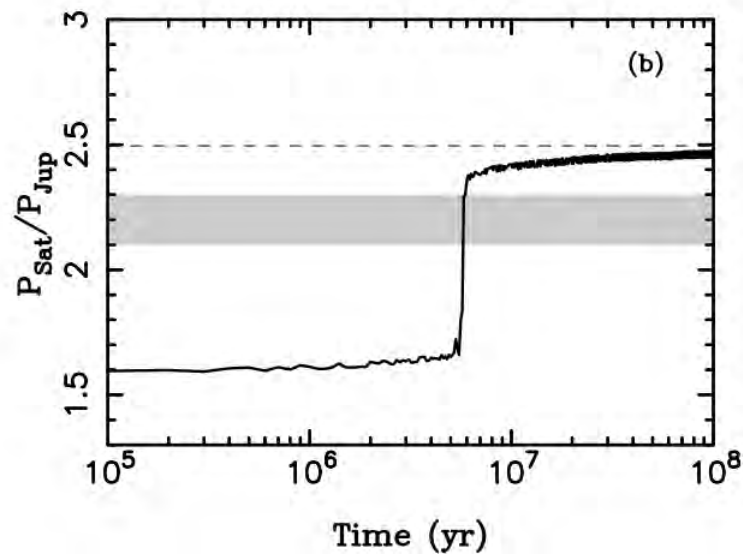
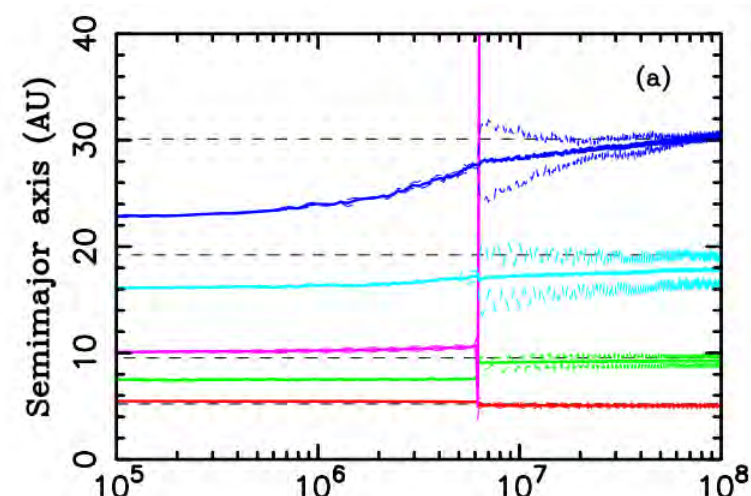
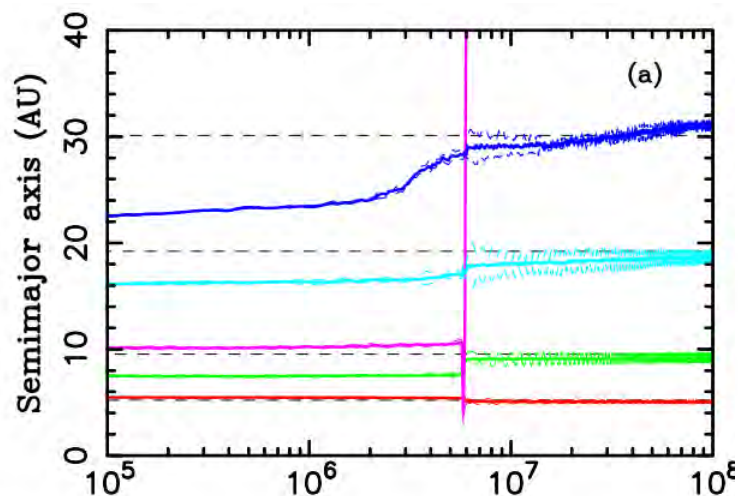
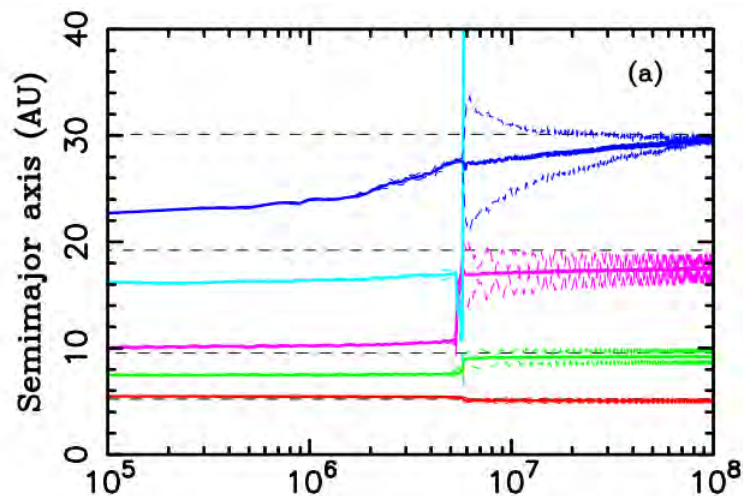
(3:2, 3:2, 2:1, 3:2), $M_{\text{disk}} = 20 M_E$





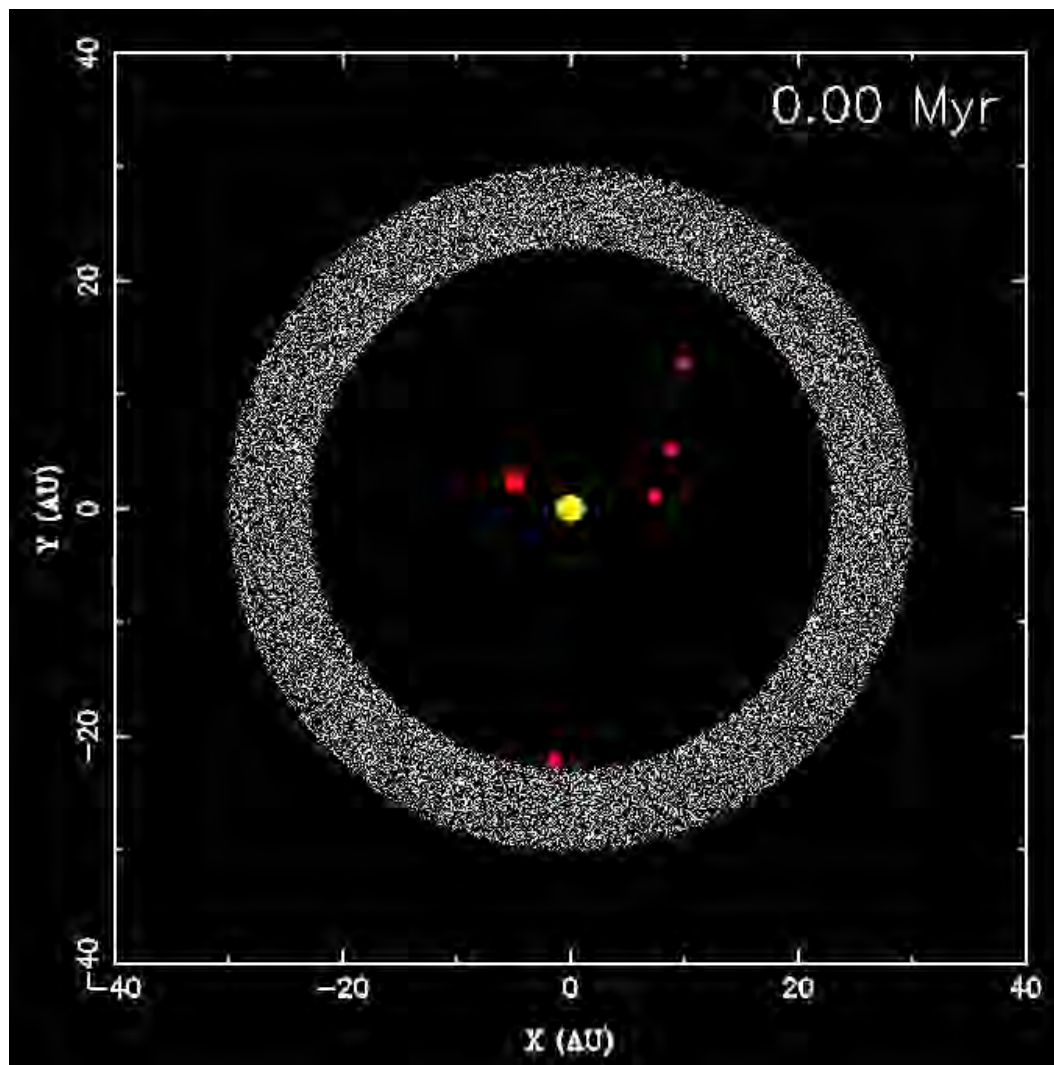
Des simulations presque parfaites.....

(3:2, 3:2, 3:2, 3:2), $M_{\text{disk}} = 35 M_E$





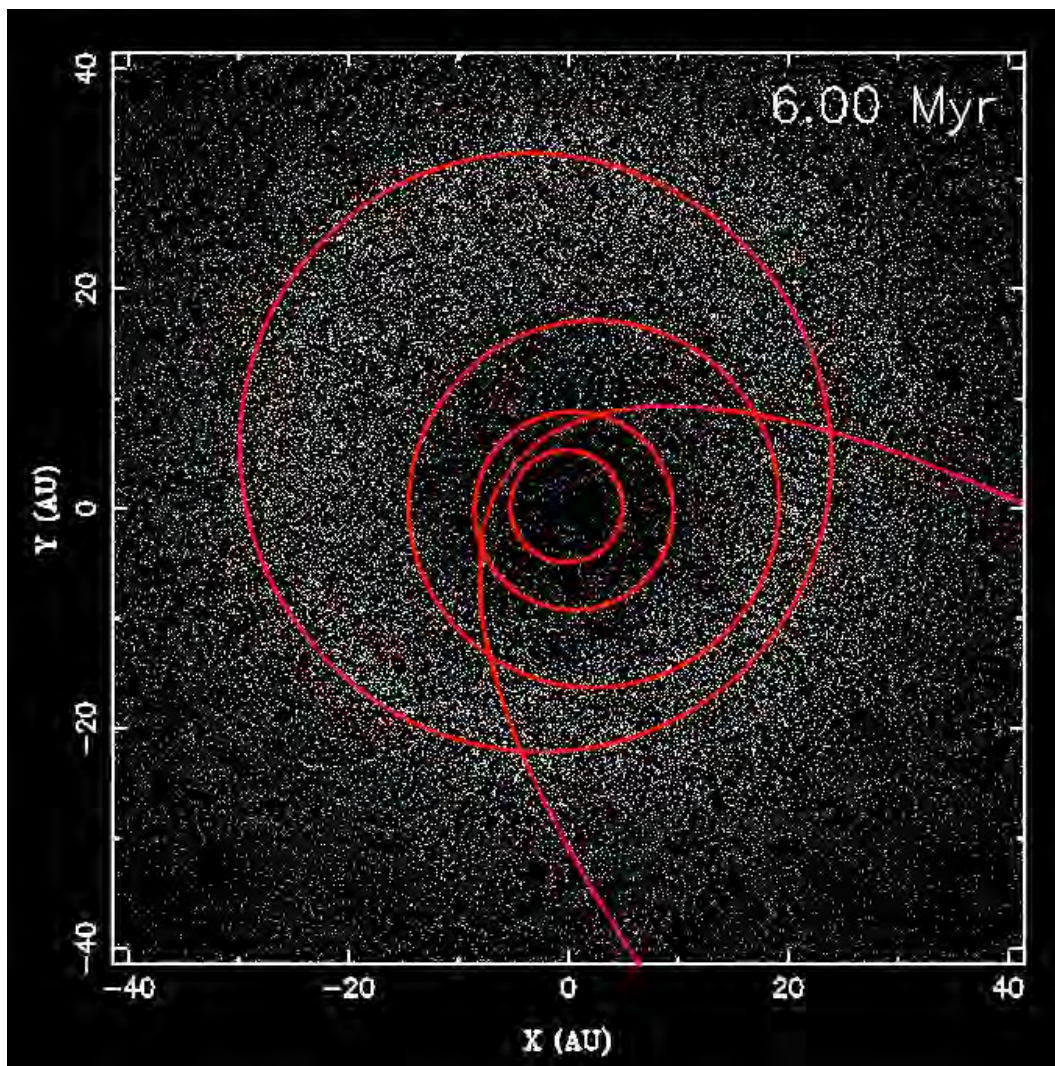
Animation



Animation par David Nesvorny



Animation

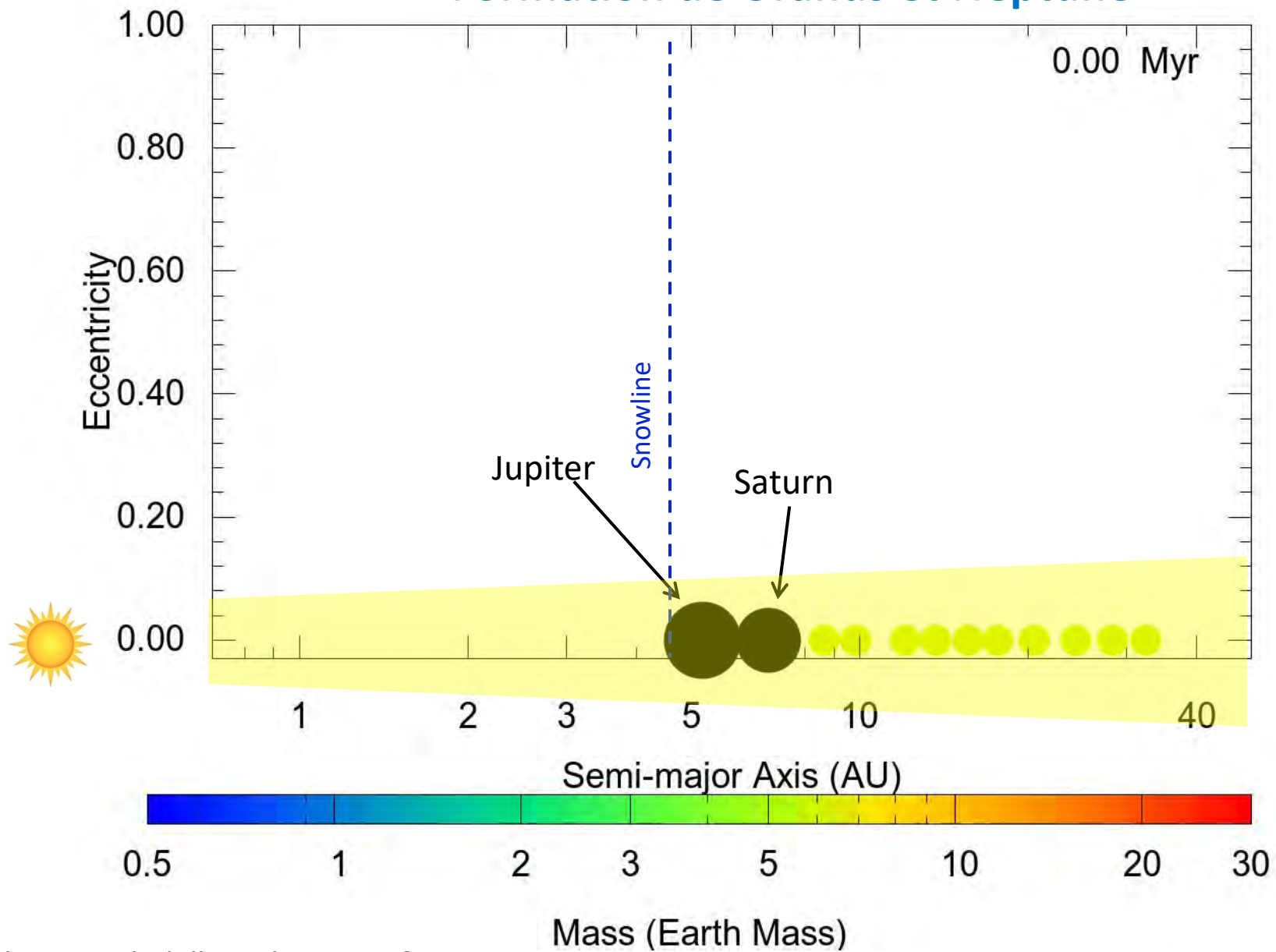


Est raisonnable de supposer que le Système solaire avait 5 planètes géantes?

Animation par David Nesvorny



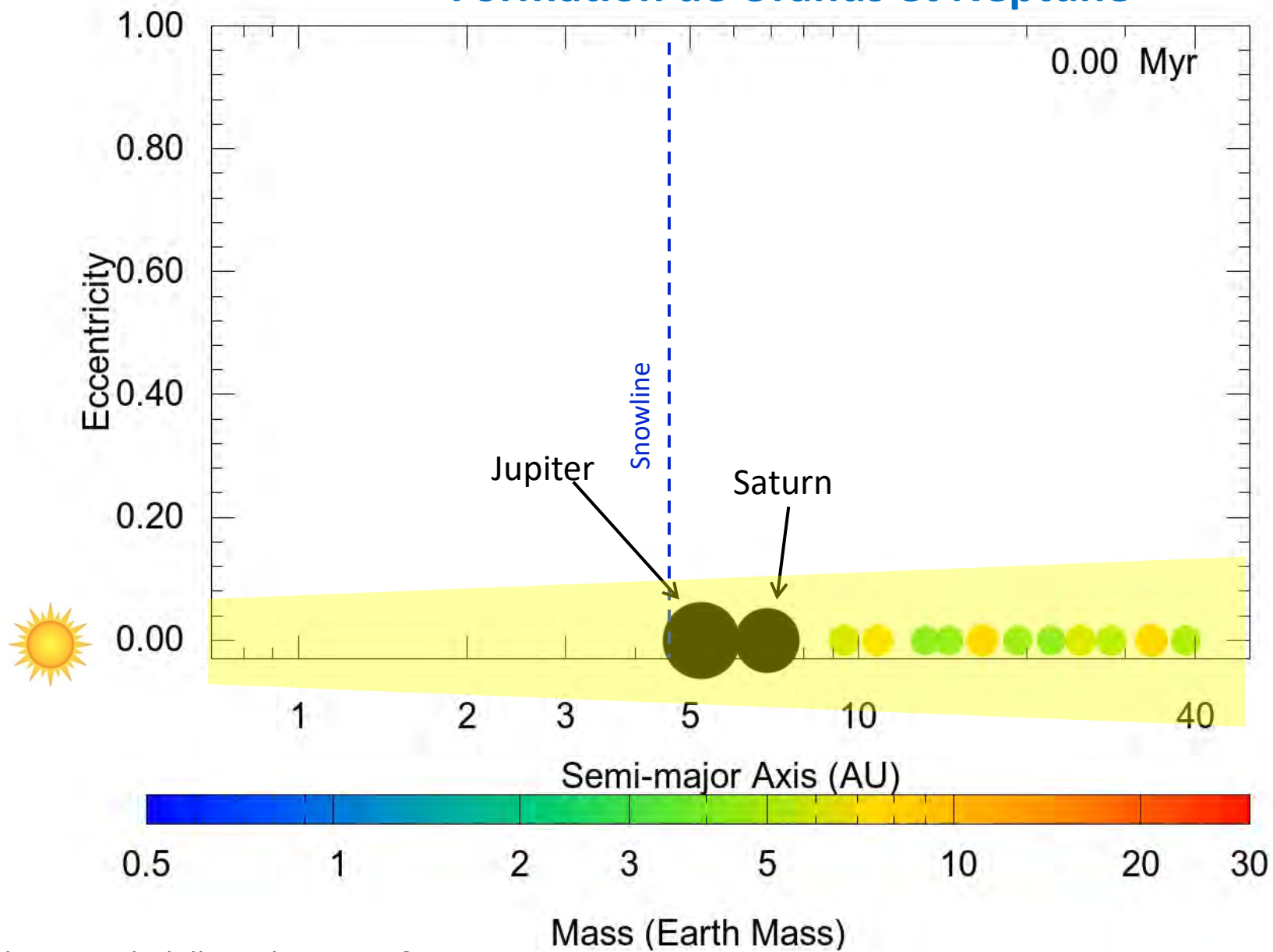
Formation de Uranus et Neptune



Izidoro, Morbidelli et al. 2015, A&A, 582



Formation de Uranus et Neptune



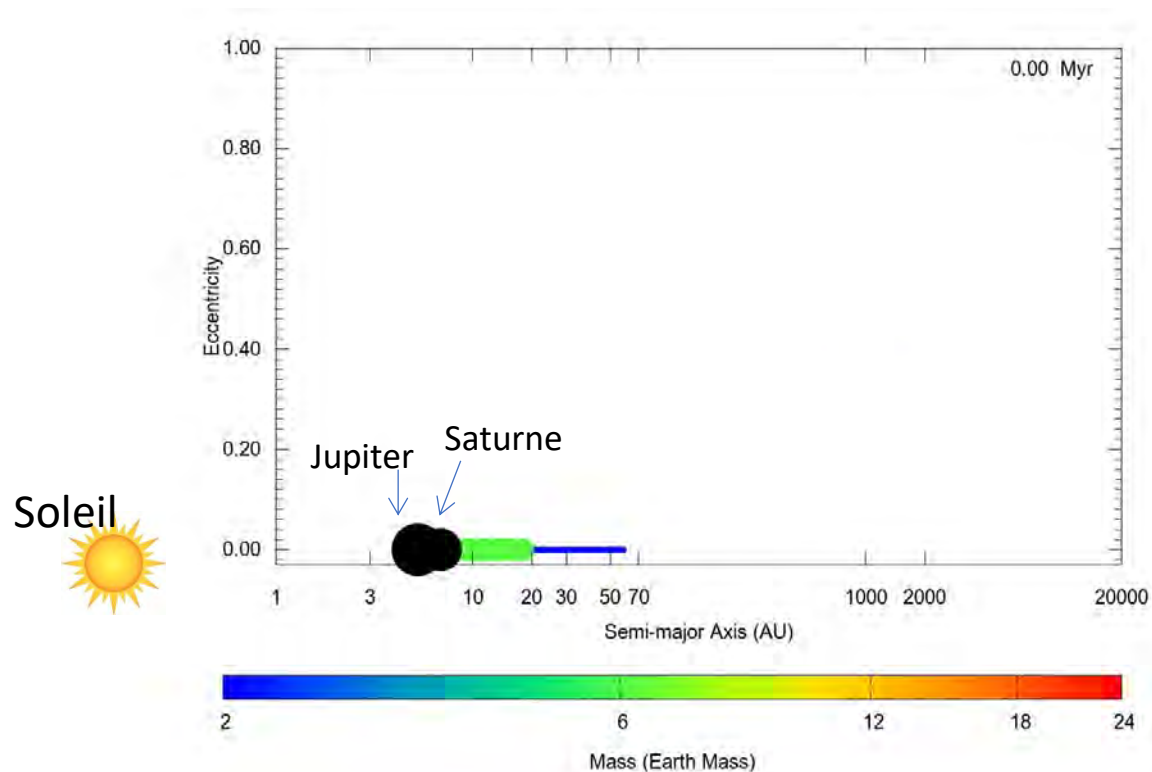
Izidoro, Morbidelli et al. 2015, A&A, 582



Est-ce que la planète expulsée pourrait être la Planète IX?

Probablement pas:

Pour piéger la planète sur une orbite de ~ 1000 ua de demi grand axe, il faut que le système solaire soit encore immergé dans un amas stellaire.

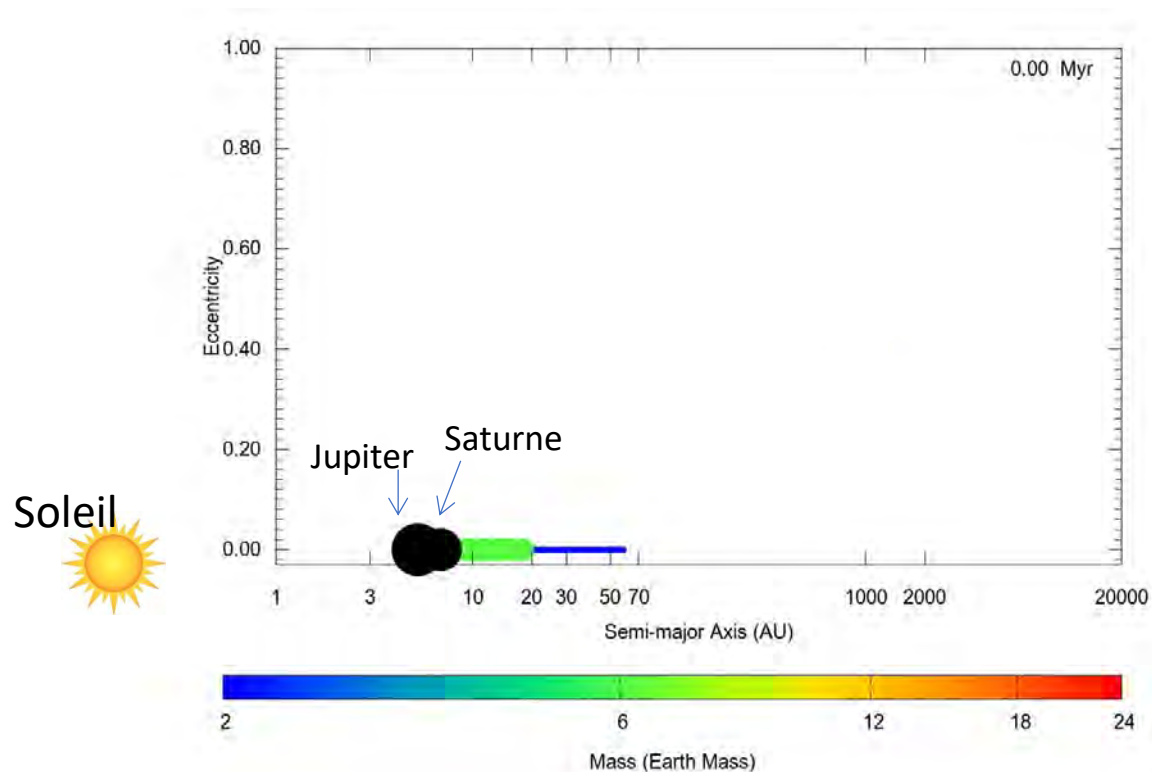




Est-ce que la planète expulsée pourrait être la Planète IX?

Probablement pas:

Pour piéger la planète sur une orbite de ~ 1000 ua de demi grand axe, il faut que le système solaire soit encore immergé dans un amas stellaire.





Est-ce que la planète expulsée pourrait être la Planète IX?

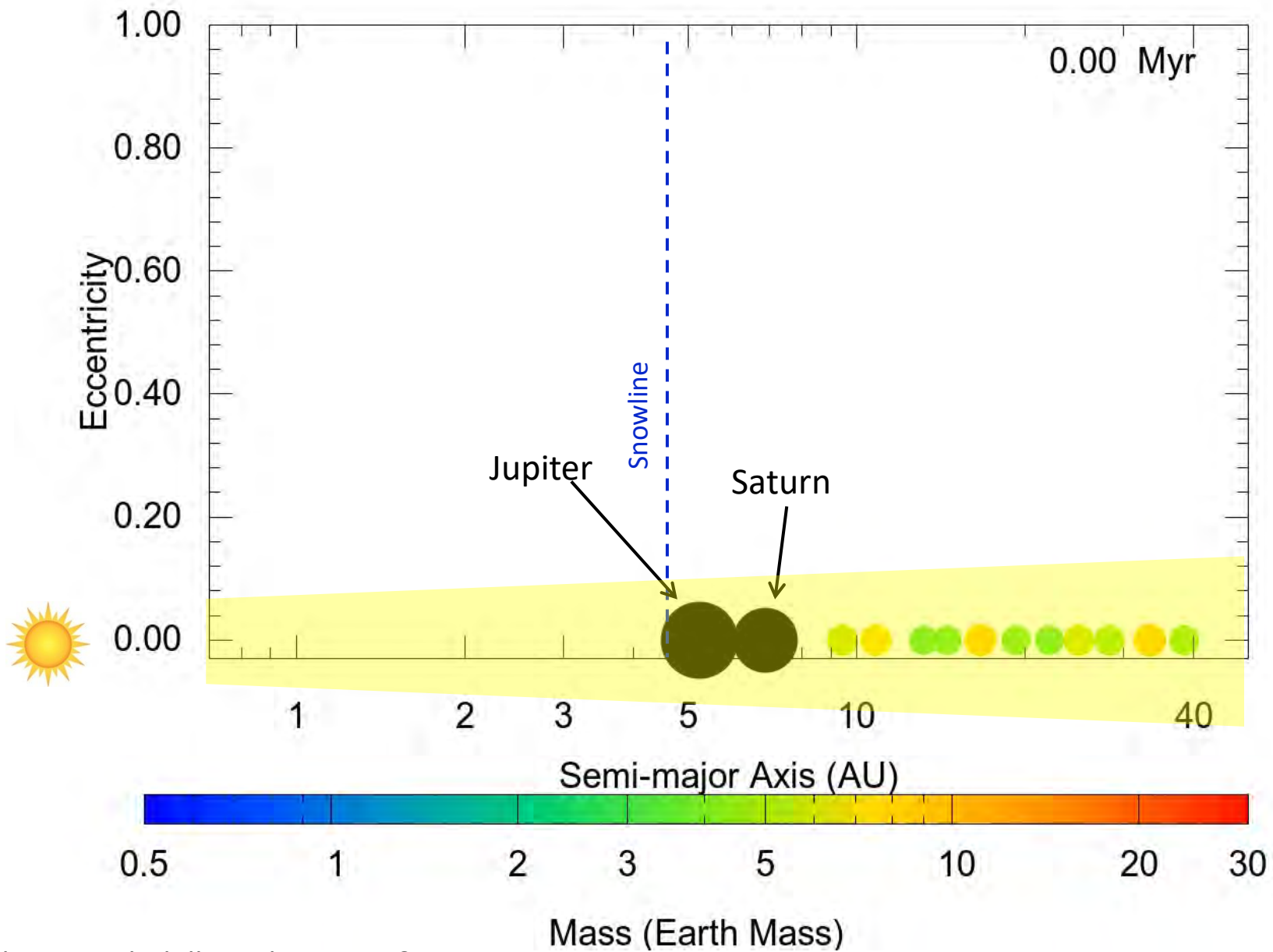
Probablement pas:

Pour piéger la planète sur une orbite de ~ 1000 ua de demi grand axe, il faut que le système solaire soit encore immergé dans un amas stellaire.

Dans ce cas, le nuage d'Oort ne se forme pas (la zone 20.000-100.000 ua est instable). Or, l'instabilité dynamique est la seule et dernière chance de le former.

On ne peut pas former le nuage d'Oort classique (~ 20.000 ua) et le nuage d'Oort interne (~ 1.000 ua) en même temps.

Il faudrait que le système solaire sorte de son amas stellaire précisément au moment de l'instabilité de façon de piéger la planète à ~ 1.000 ua et les planétésimaux dispersés à ~ 20.000 ua juste après. Très *ad hoc* et encore pas évident d'avoir assez d'objets dans le nuage à la fin.



Izidoro, Morbidelli et al. 2015, A&A, 582



A retenir

- Dans les conditions initiales du modèle de Nice les planètes devraient être dans une chaîne résonnante
- Les chaînes résonnantes à 4 planètes difficilement reproduisent le système actuel via une instabilité car:
 - Si le disque des planétésimaux a une faible masse (30-50 M_E) on tend à perdre une planète
 - Si le disque de planétésimaux est plus massif (75-100 M_E) les instabilités sont amorties
 - Les simulations dans lesquelles les 4 planètes survivent tendent à avoir des faibles instabilités
 - Ceci donne des excentricités et inclinaisons finales trop faibles, particulièrement pour Jupiter et Saturne
- Si on rajoute une 5ème planète de masse comparable à Uranus et Neptune, l'instabilité peut être plus violente, une planète peut être perdue et la probabilité de reproduire le système des planètes géantes actuelles est significativement plus élevée.
- Les probabilités de succès sont néanmoins de l'ordre de 5-10%, pas plus
- La planète éjectée n'est pas la Planète IX
- Si la Planète IX existe elle a été mise sur son orbite pendant la phase de formation des planètes neptuniennes, et pas lors de l'instabilité finale des planète géantes
- Les chaînes résonnantes présentées ici ont Jupiter et Saturne en résonance 3:2, comme attendu si ces planètes ont évolué dans un disque relativement visqueux – dans le prochain séminaire un modèle de Nice valable pour des disques à faible viscosité sera présenté.