



## Leçon N. 4 – 12 Novembre 2024

Alessandro  
**MORBIDELLI**

Chaire

**Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes**

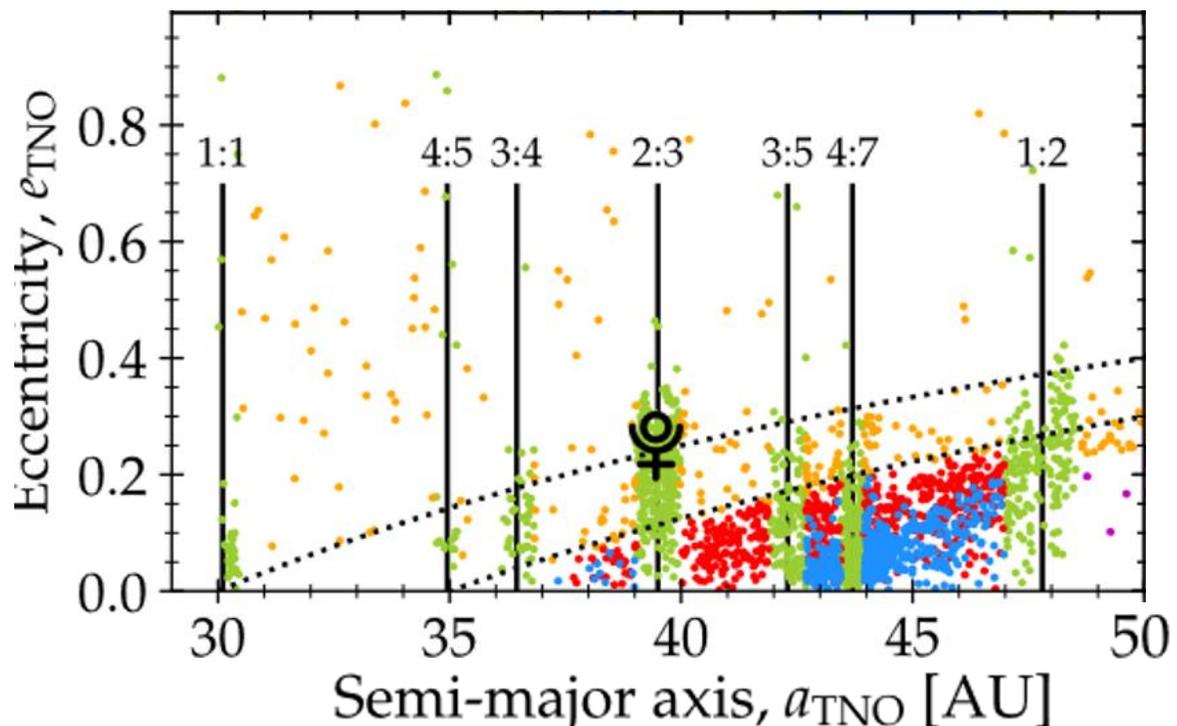
***Origine et évolution du Système solaire externe:  
L'origine de la structure de la ceinture de Kuiper : premiers modèles***



## Origine de la structure de la ceinture de Kuiper

Pourquoi Pluton et beaucoup d'autre objets sont en résonance de moyen mouvement avec Neptune?

Travaux de Malhotra (1993, 1995)





# Migration planétaire induite par les planétésimaux: une planète

Après la disparition du gaz

Interaction planète - planétésimaux  
via rencontres proches

Fernandez et Ip, 1984

Ida et al., 2000

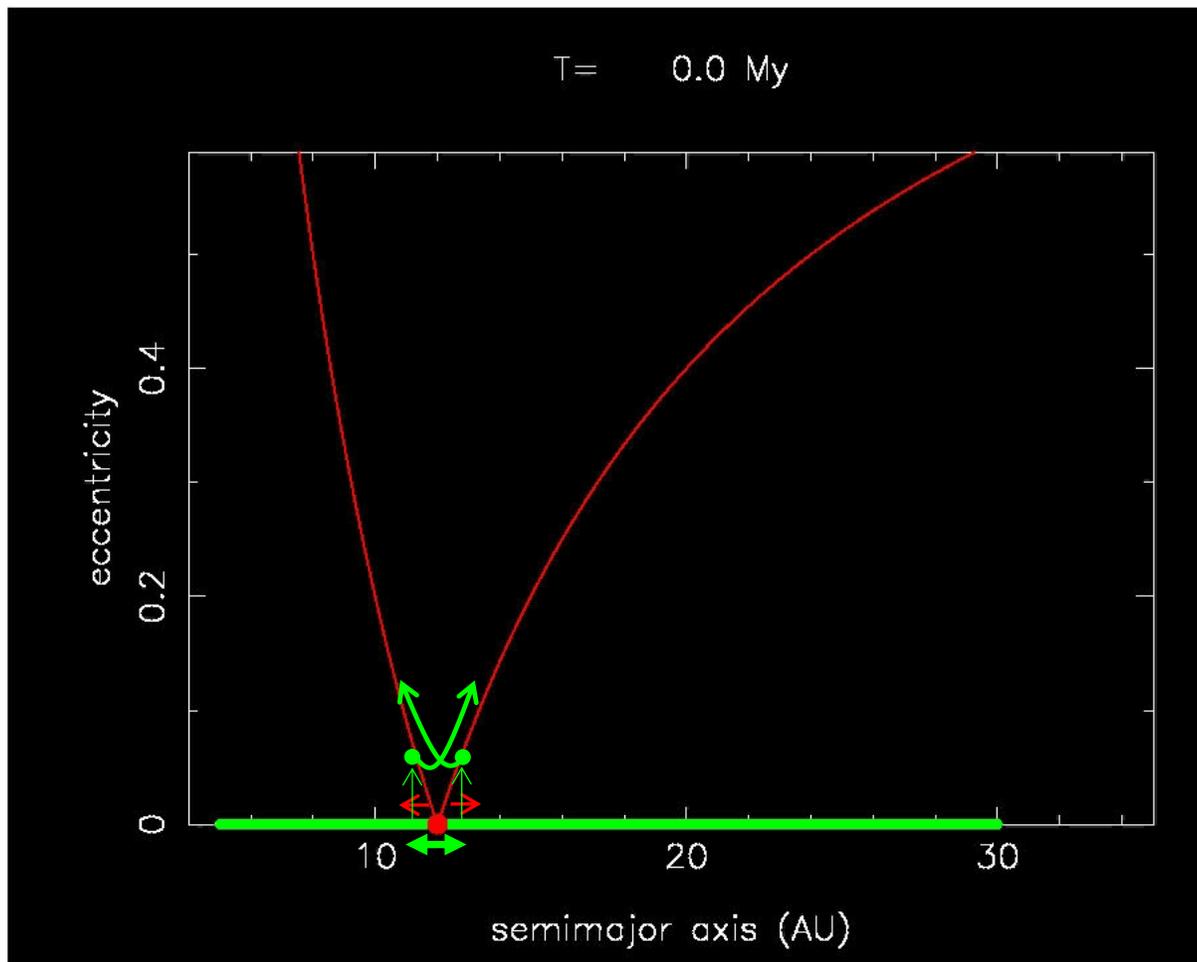
Kirsh et al. 2009

Les rencontres avec les planétésimaux  
internes sont plus fréquents car la  
période synodique  
est plus courte

$$T_{\text{syn}} = \frac{2\pi}{\left| \frac{2\pi}{T_{\text{pl}}} - \frac{2\pi}{T_P} \right|}$$

$$a = a_P (1 \pm \delta)$$

$$T_{\text{syn}} \approx \left( \frac{2}{3\delta} \pm 1 \right) T_P$$



La planète a donc tendance à démarrer sa migration vers l'intérieur



# Migration planétaire induite par les planétésimaux: une planète

Après la disparition du gaz

Interaction planète - planétésimaux  
via rencontres proches

Fernandez et Ip, 1984

Ida et al., 2000

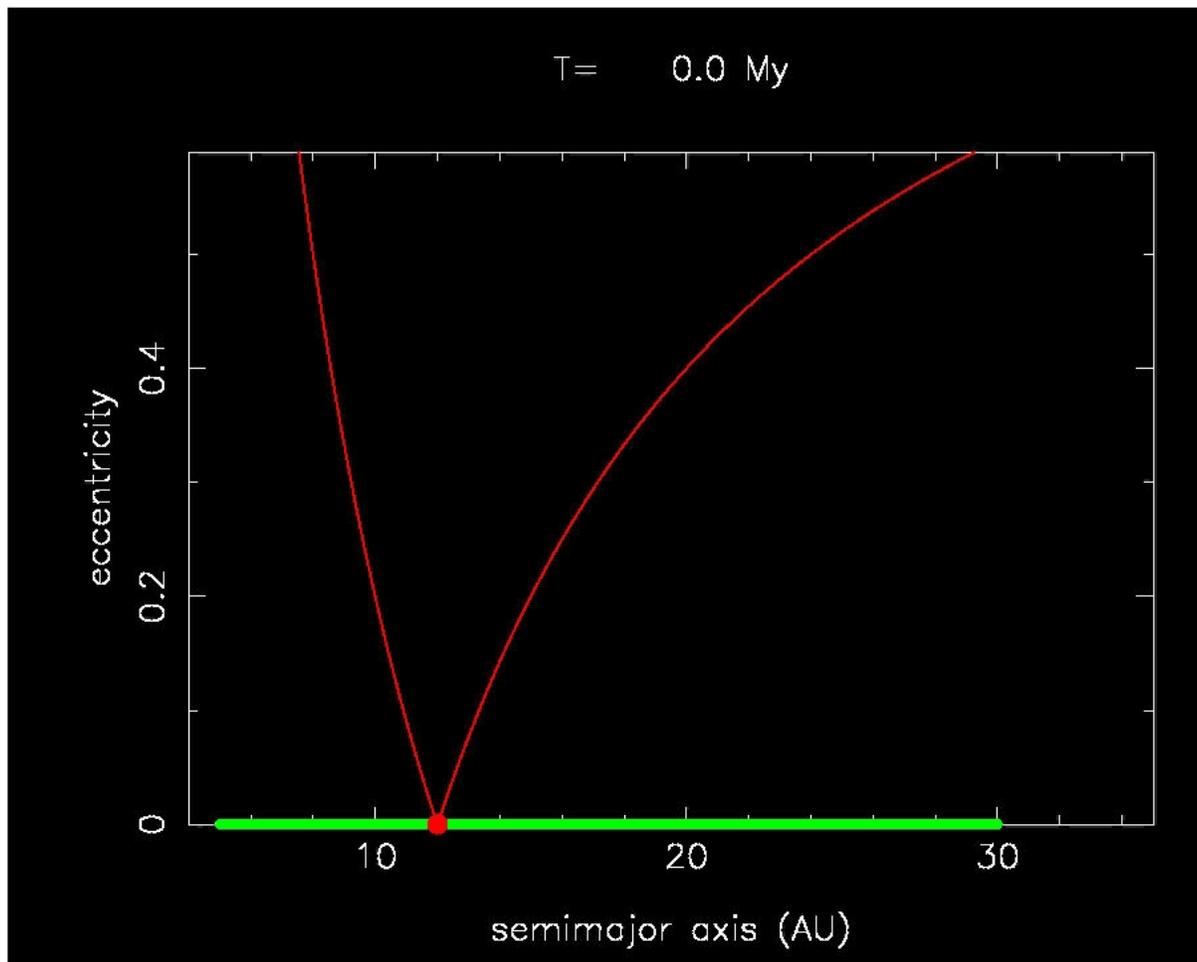
Kirsh et al. 2009

Les rencontres avec les planétésimaux  
internes sont plus fréquents car la  
période synodique  
est plus courte

$$T_{\text{syn}} = \frac{2\pi}{\left| \frac{2\pi}{T_{\text{pl}}} - \frac{2\pi}{T_P} \right|}$$

$$a = a_P (1 \pm \delta)$$

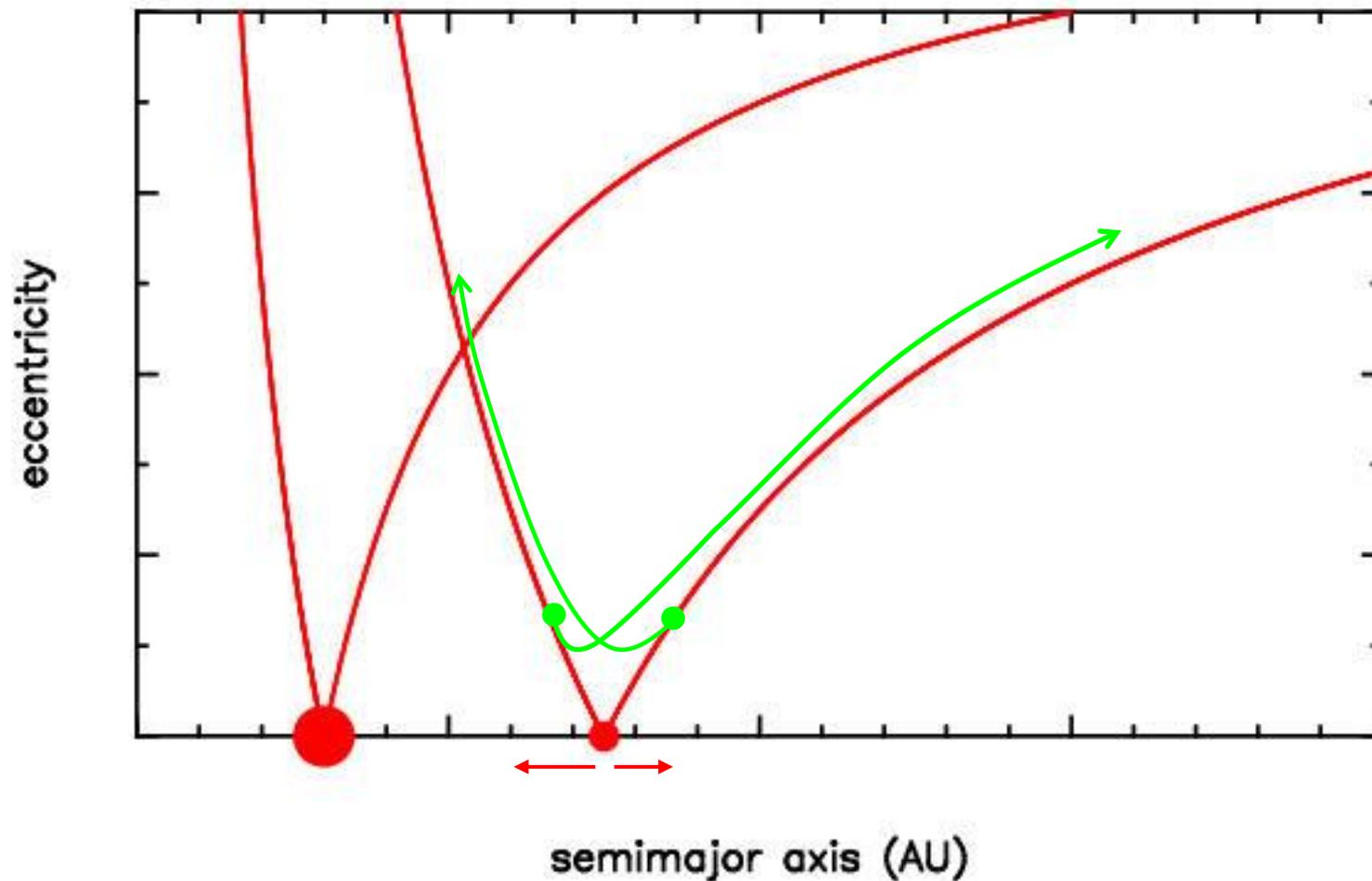
$$T_{\text{syn}} \approx \left( \frac{2}{3\delta} \mp 1 \right) T_P$$



La planète a donc tendance à démarrer sa migration vers l'intérieur  
Une fois démarrée, la migration s'auto-entretient

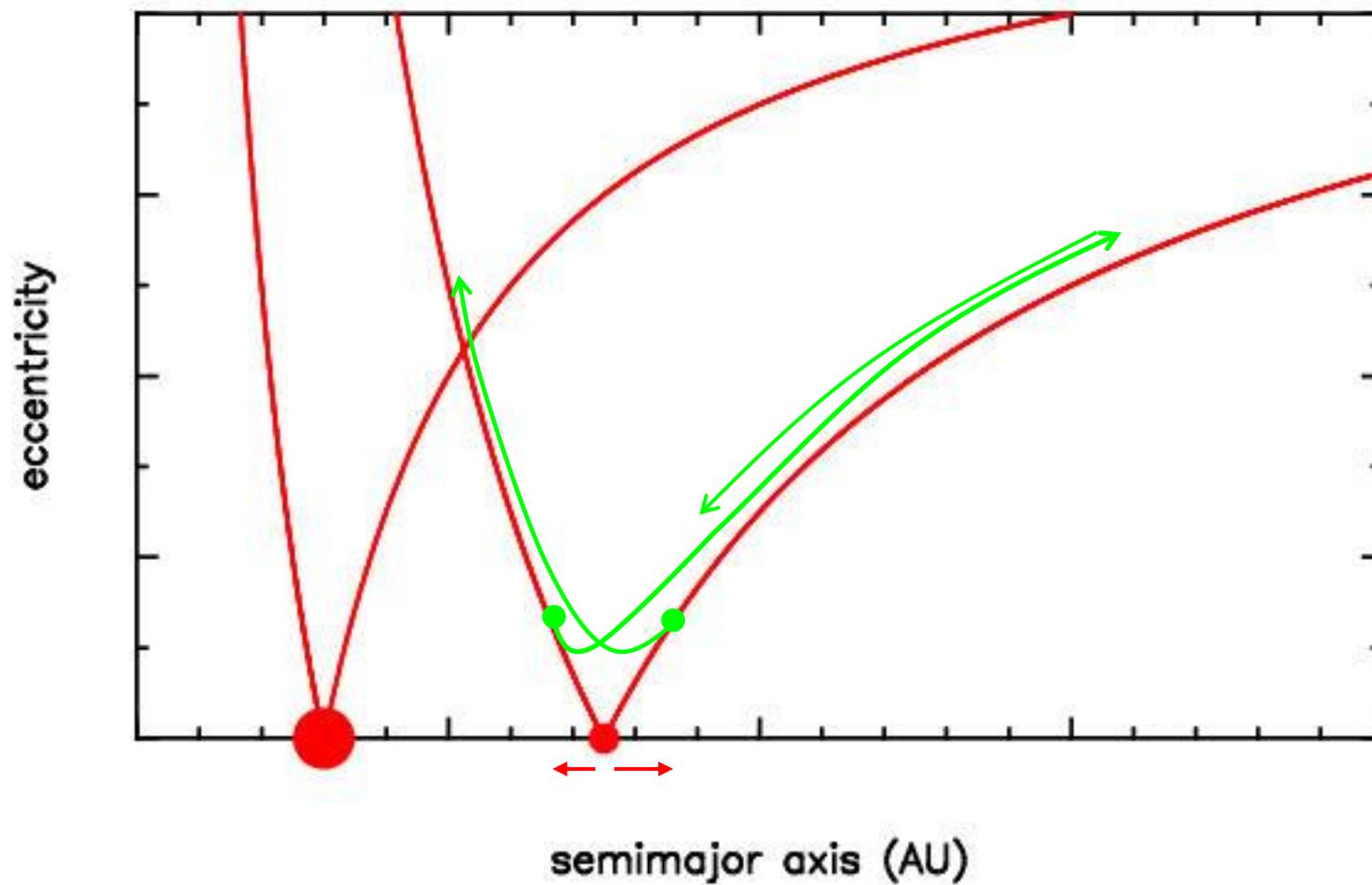


# Migration planétaire induite par les planétésimaux: deux planètes



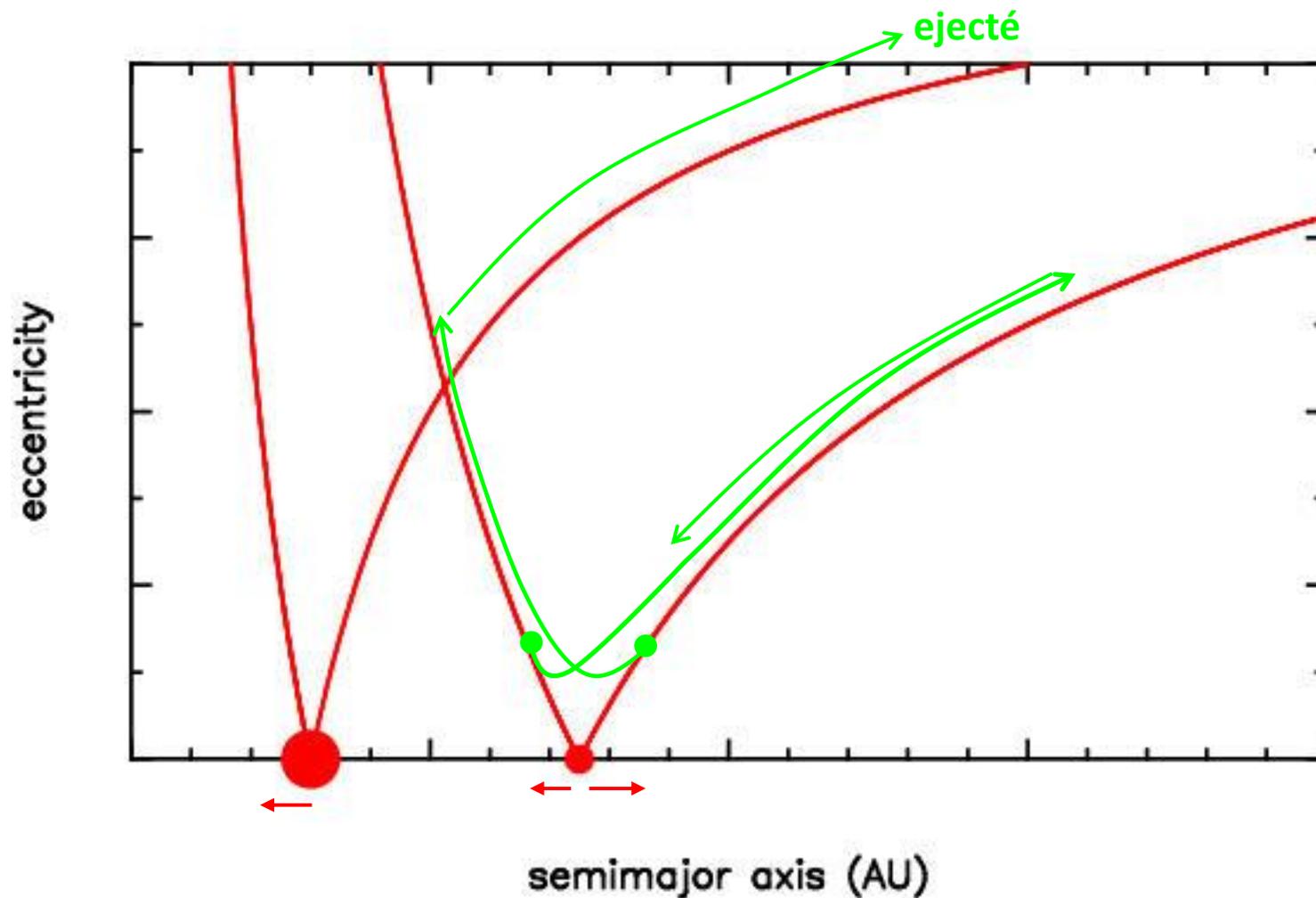


# Migration planétaire induite par les planétésimaux: deux planètes



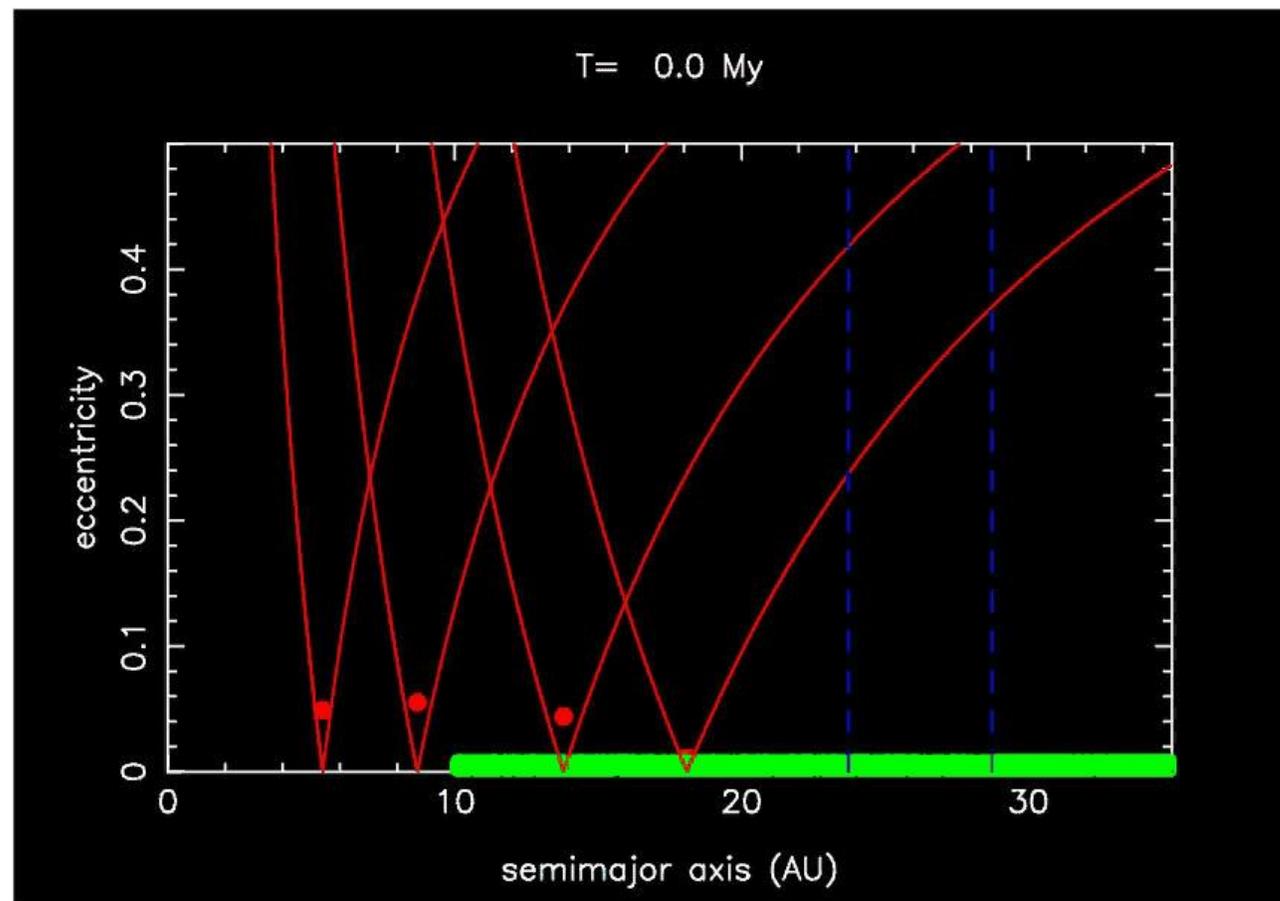


# Migration planétaire induite par les planétésimaux: deux planètes





## Migration planétaire induite par les planétésimaux: les planètes géantes du Système solaire

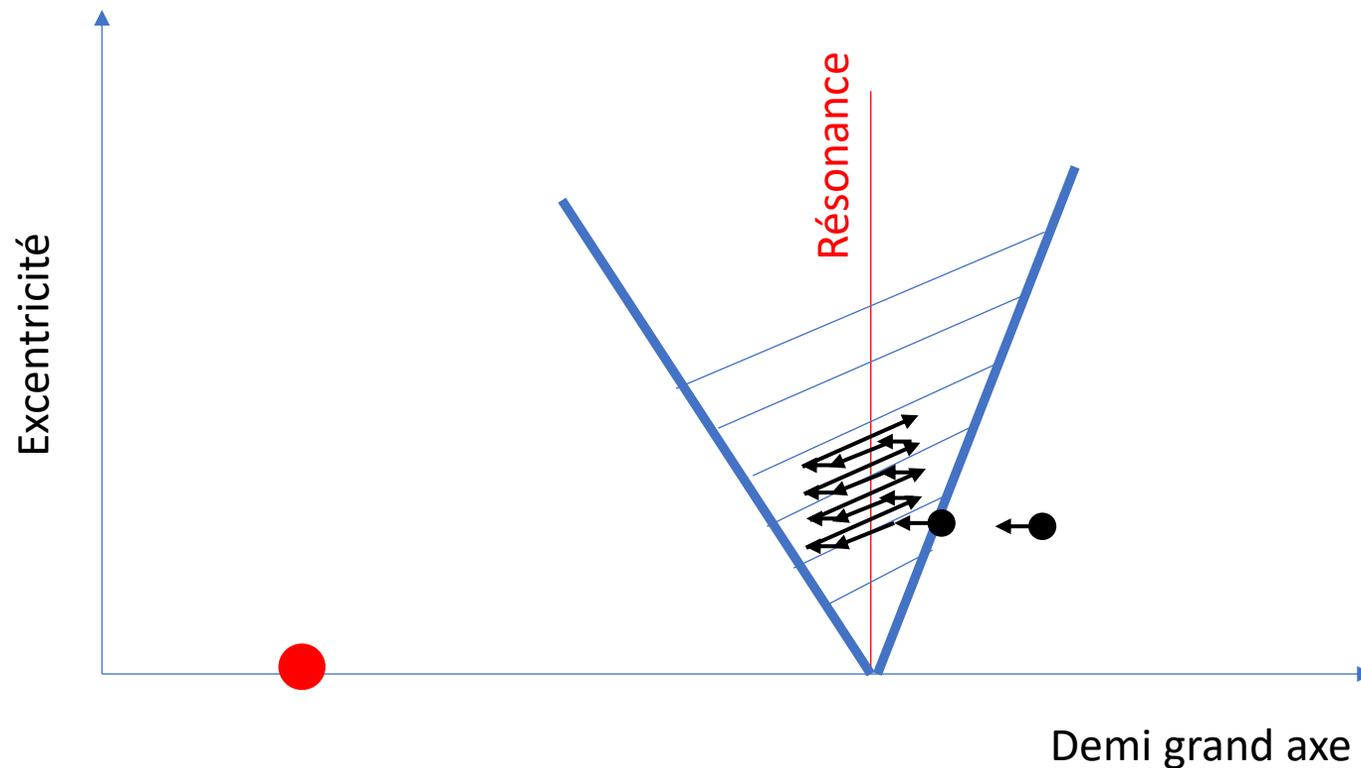


Fernandez et Ip, 1984



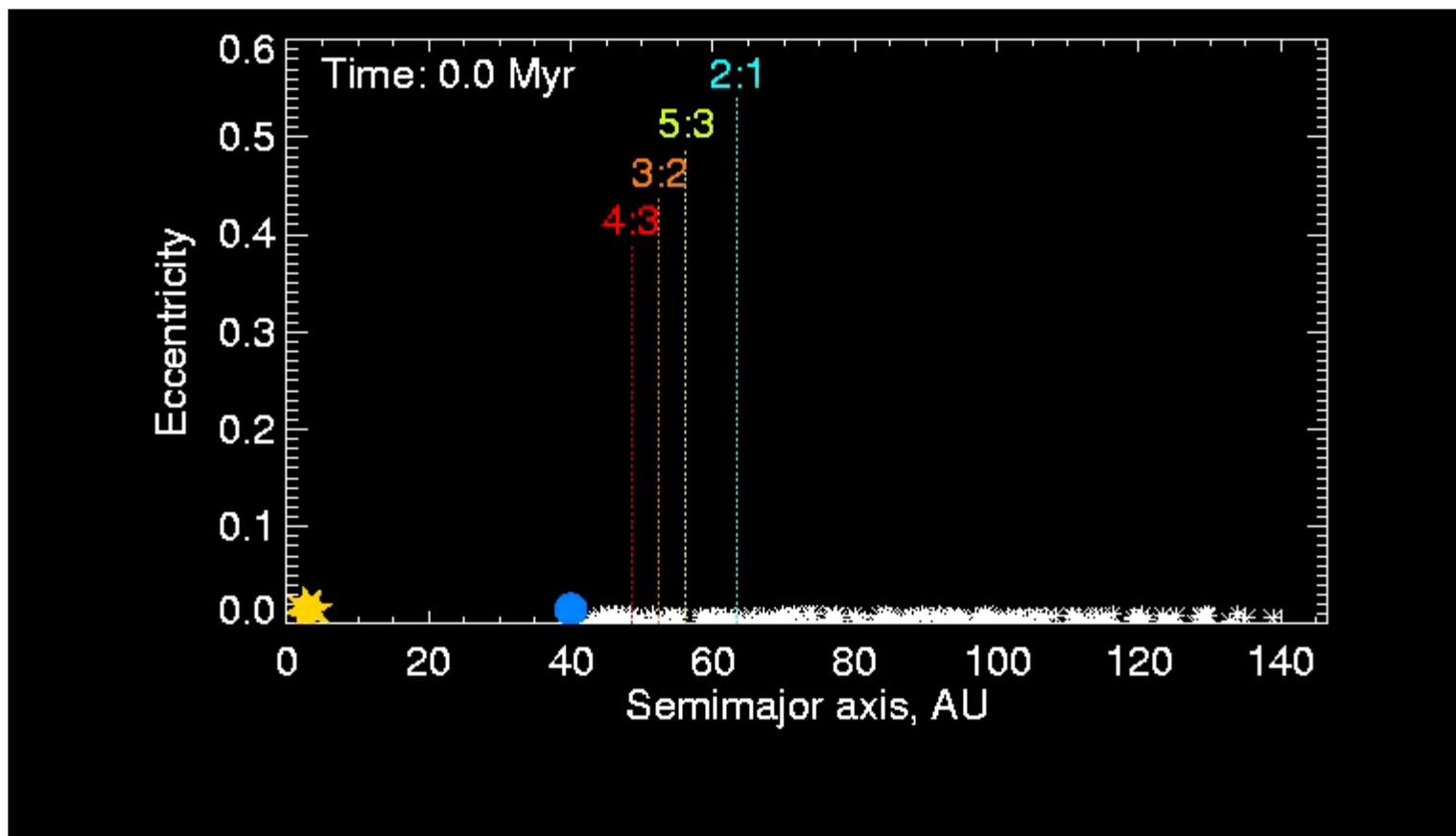
# Migration, capture en résonance et croissance de l'excentricité

- Planète (circulaire)
- Petit corps (elliptique)



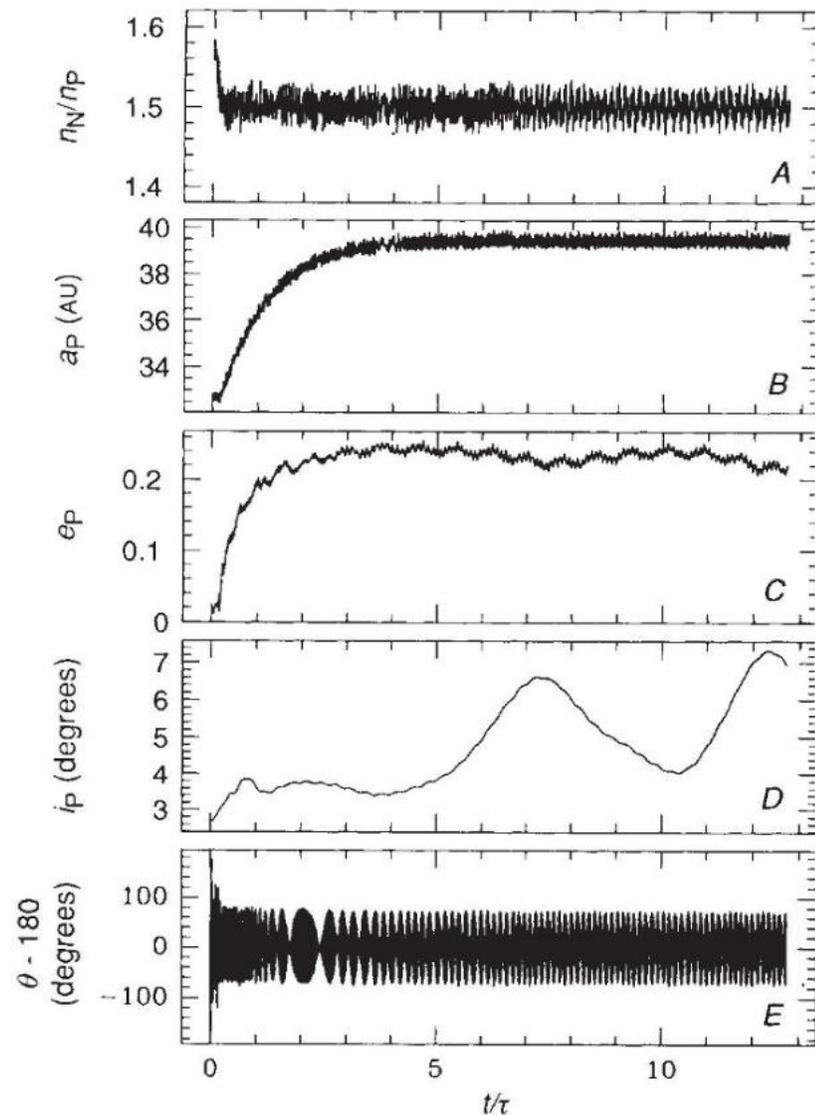


# Migration, capture en résonance et croissance de l'excentricité





## Capture de Pluton en résonance 3/2 avec Neptune



Malhotra, 1993, Nature

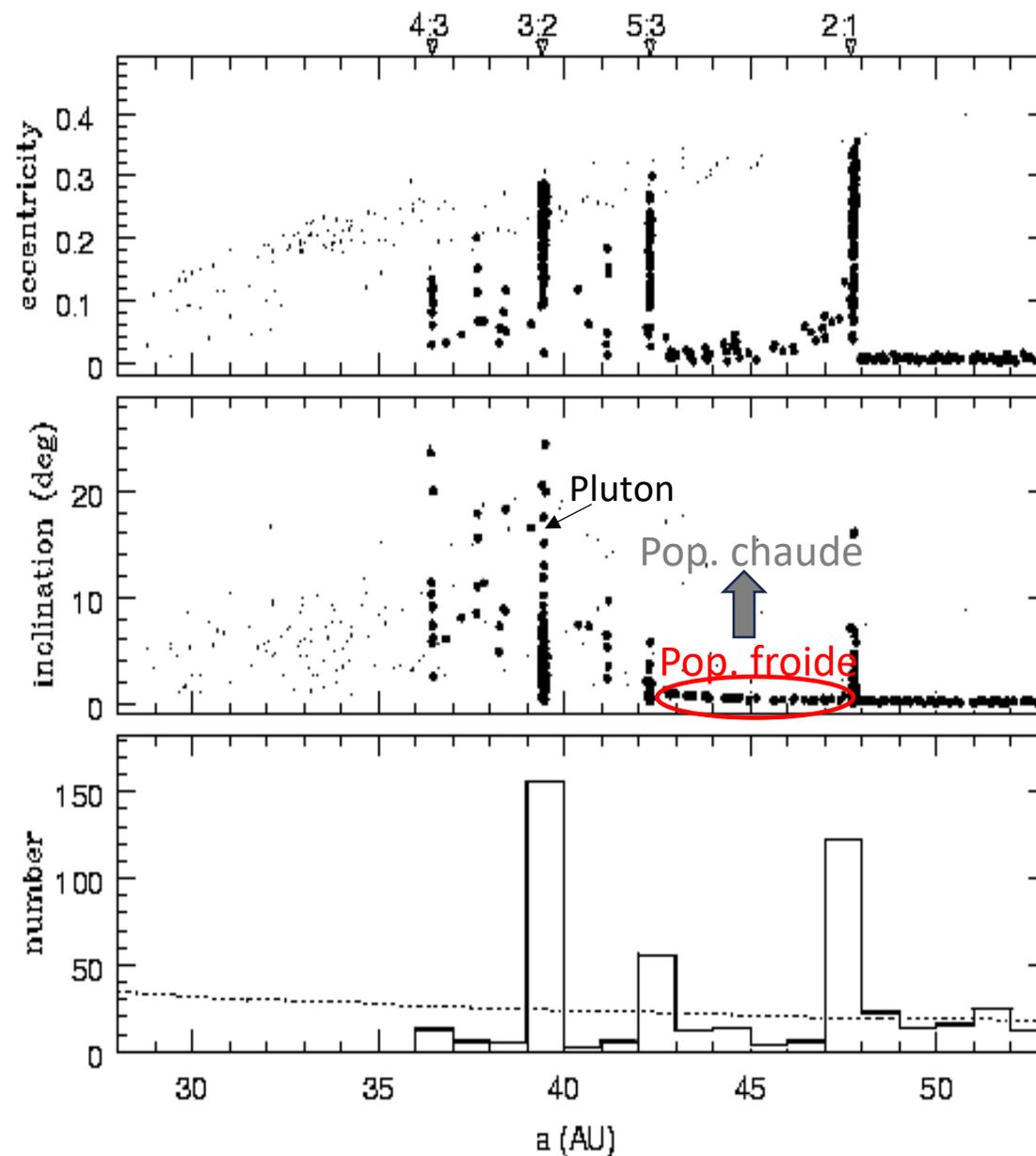


## Capture des objets de Kuiper dans les résonances avec Neptune

Pas d'excitation des inclinaisons des objets non-résonnants

OK pour la population froide, mais pas d'explication pour la population chaude

Mécanismes capables d'expliquer l'excitation des inclinaisons d'une partie des objets non-résonnants ne pourraient pas expliquer les différences en couleur, spectres et distributions de tailles entre les populations chaude et froide



Hahn et Malhotra, 1999

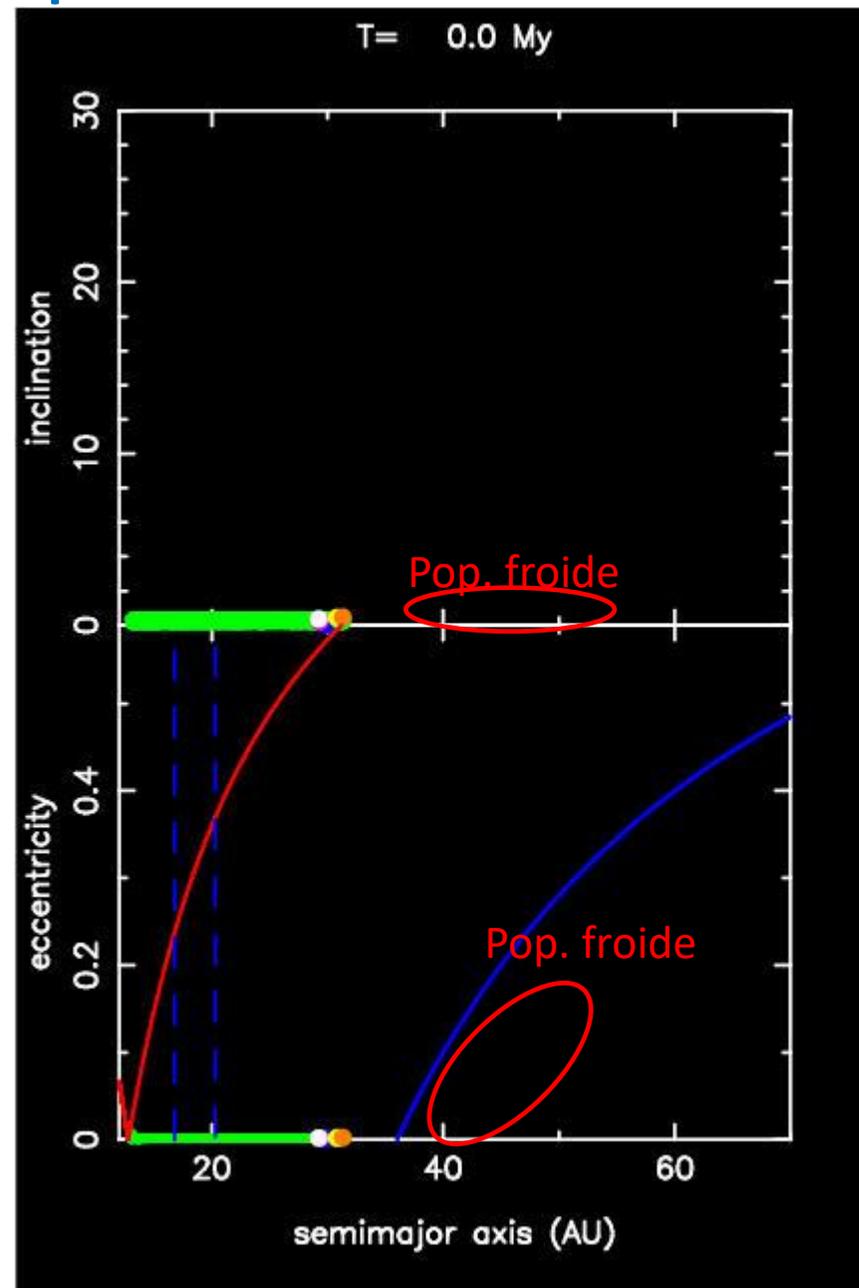


## Origine de la population chaude

Gomes, 2003, *Icarus*

Toujours basé sur la migration de Neptune

Introduit le concept de deux disques de planétésimaux: un massif, étendu jusqu'à ~30 ua et responsable de la migration de Neptune, l'autre avec beaucoup moins de masse, progéniteur de la population froide



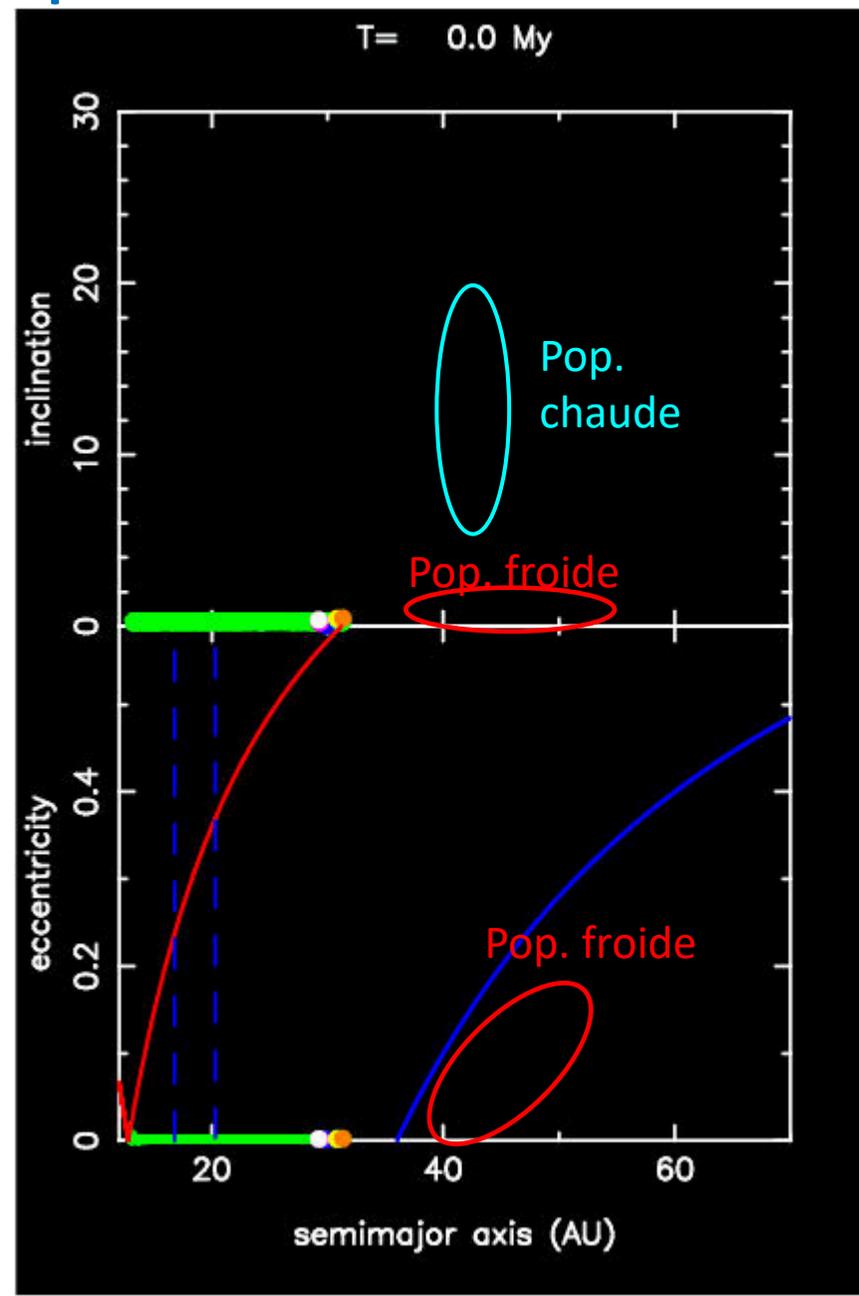


## Origine de la population chaude

Gomes, 2003, *Icarus*

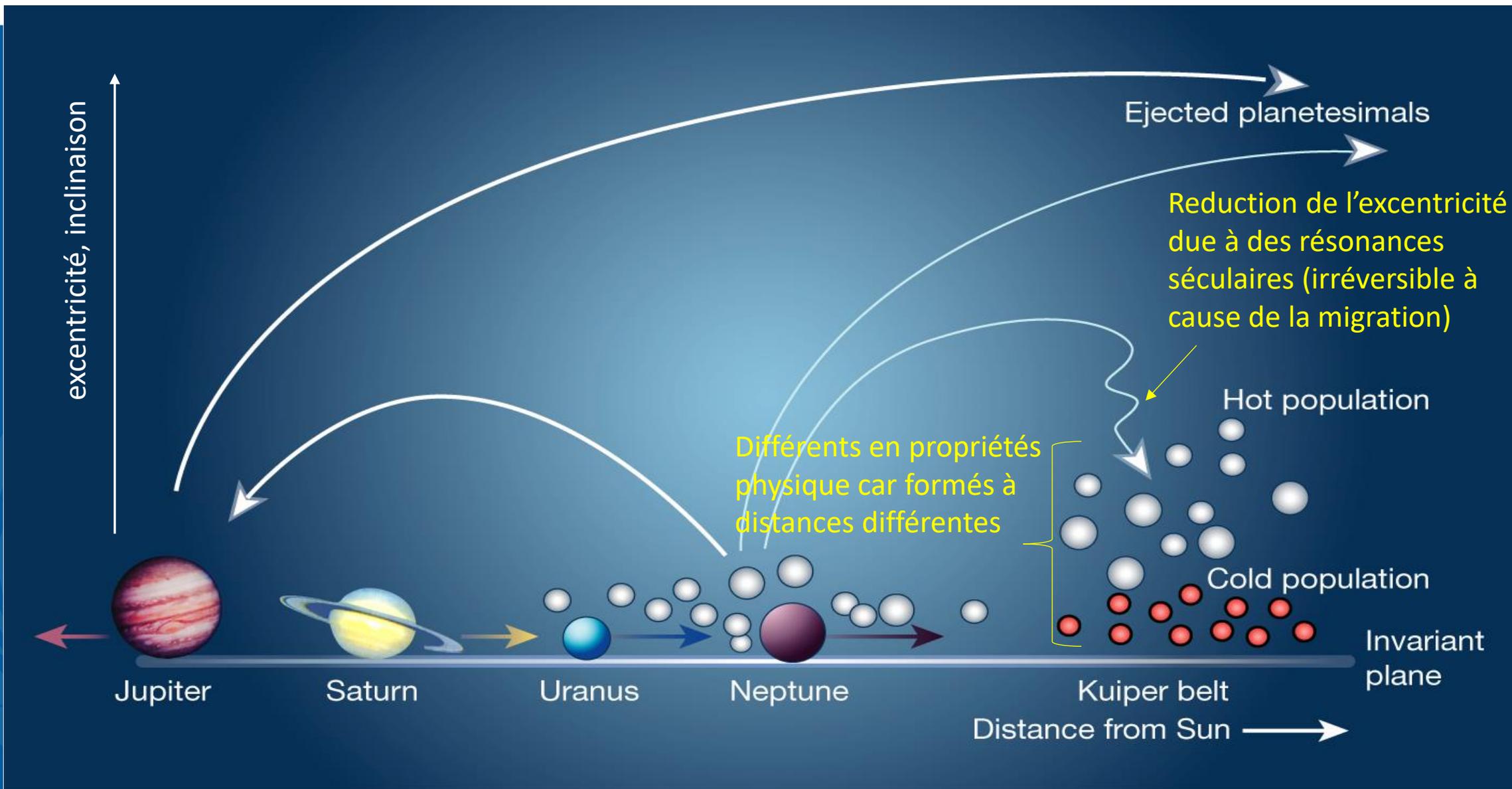
Toujours basé sur la migration de Neptune

Introduit le concept de deux disques de planétésimaux: un massif, étendu jusqu'à ~30 ua et responsable de la migration de Neptune, l'autre avec beaucoup moins de masse, progéniteur de la population froide





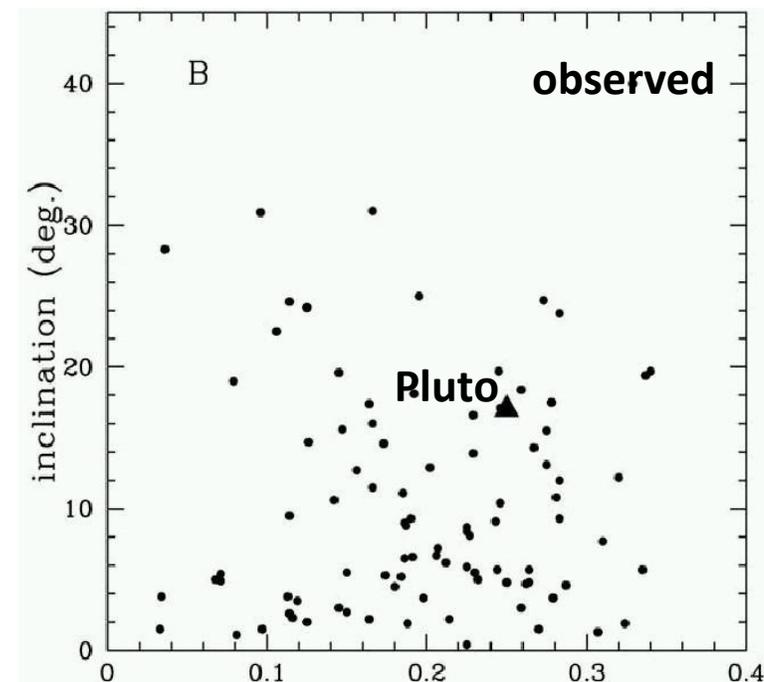
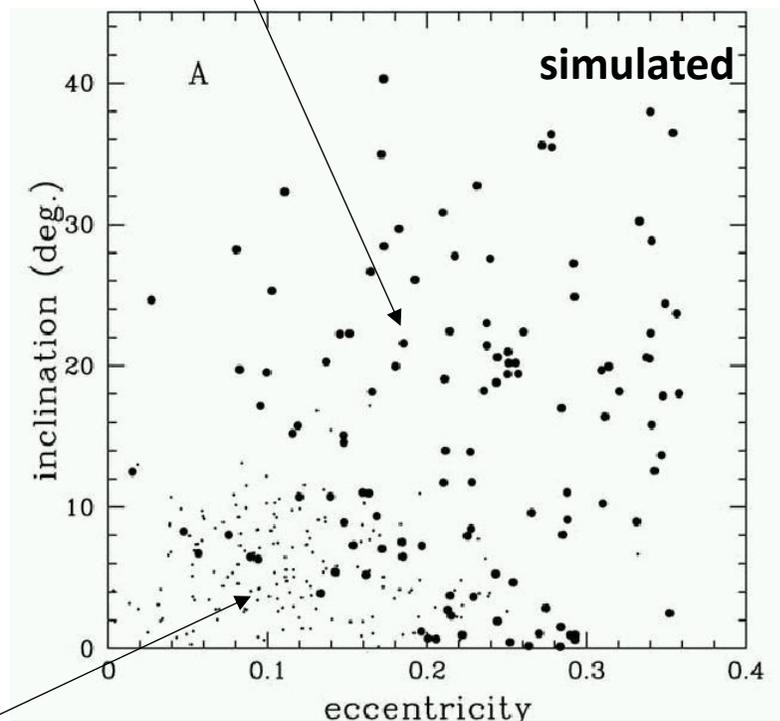
# Origine de la population chaude





# Population résonnantes dans le modèle de Gomes

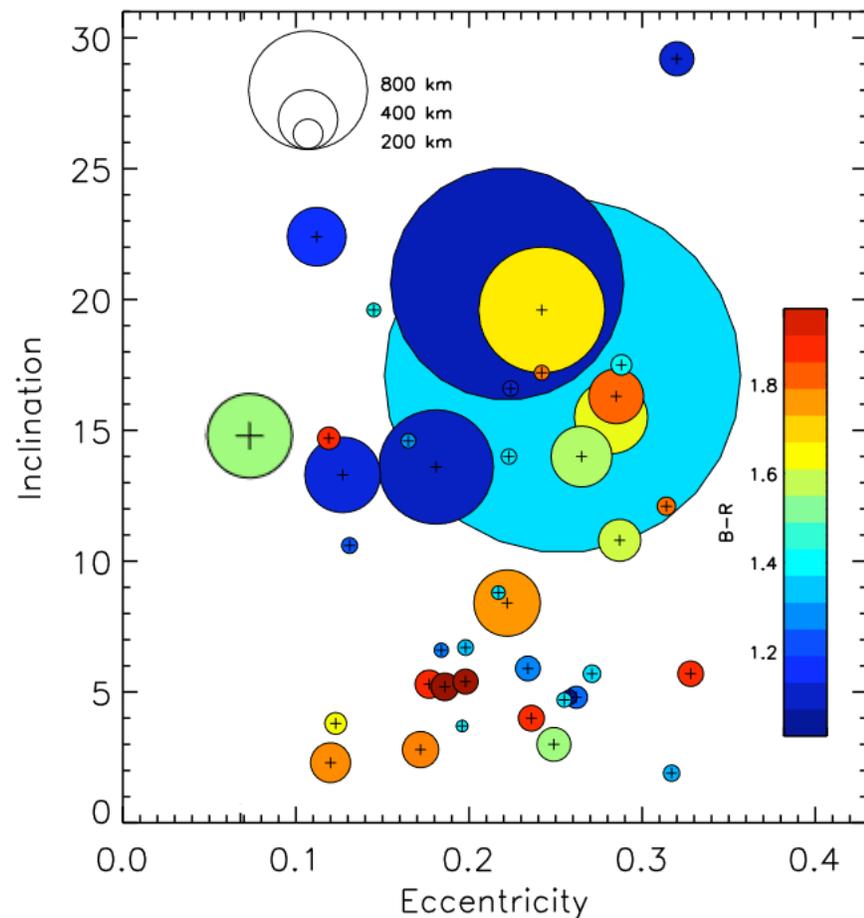
Population dispersée par Neptune  
(analogue à la population chaude)



Population capturée à la Malhotra depuis le disque  
(analogue à la population froide)



## Les couleurs de Plutinos



Confirme l'absence d'une population prédominante rouge, analogue à la population froide

Ceci confirme que le disque distant avait une très faible masse par rapport au disque dispersé par Neptune, pour compenser le fait que sa probabilité de capture en résonance est plus élevée

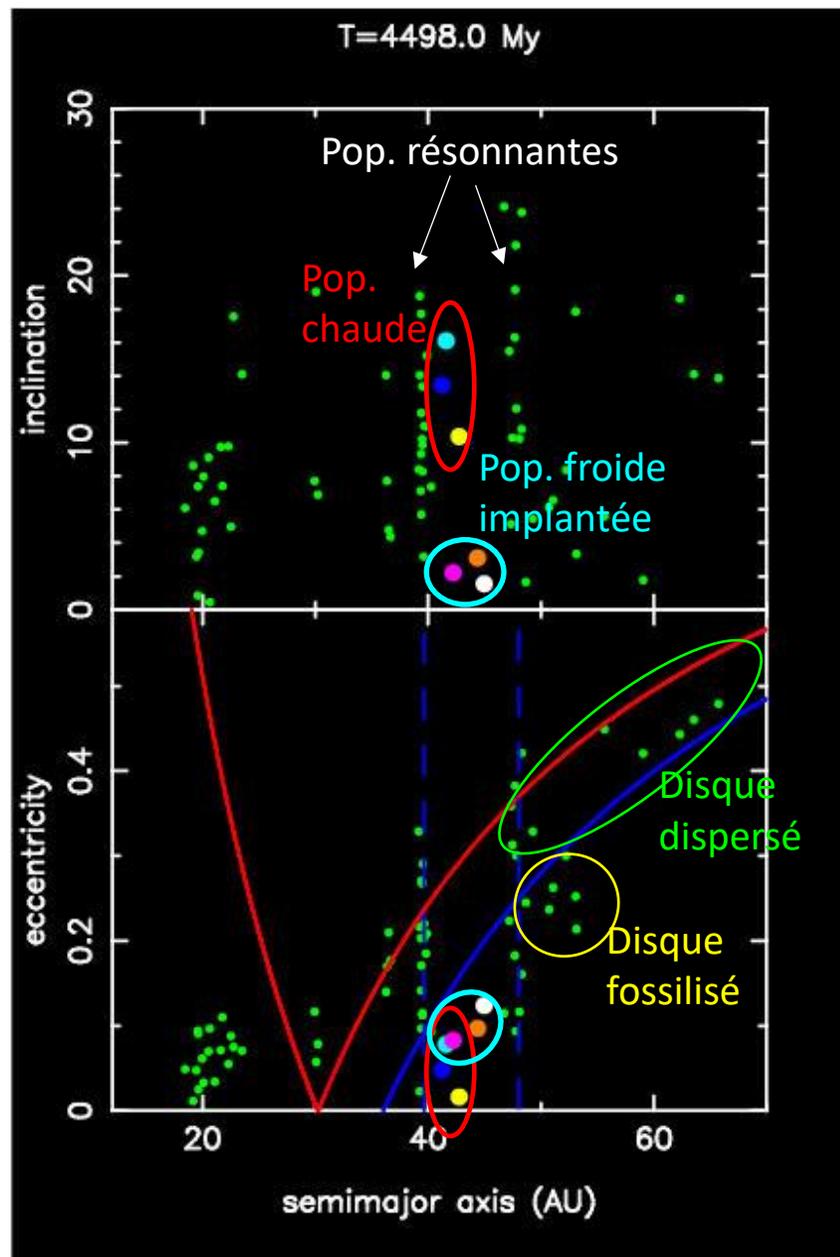
Le fait que la population froide est  $\sim 1/10$  en masse de la population chaude en est une autre confirmation.

Almeida et al., 2009



# Le disque dispersé (et fossilisé) comme extension de la population chaude

Etat final du modèle de  
Gomes (2003, *Icarus*)

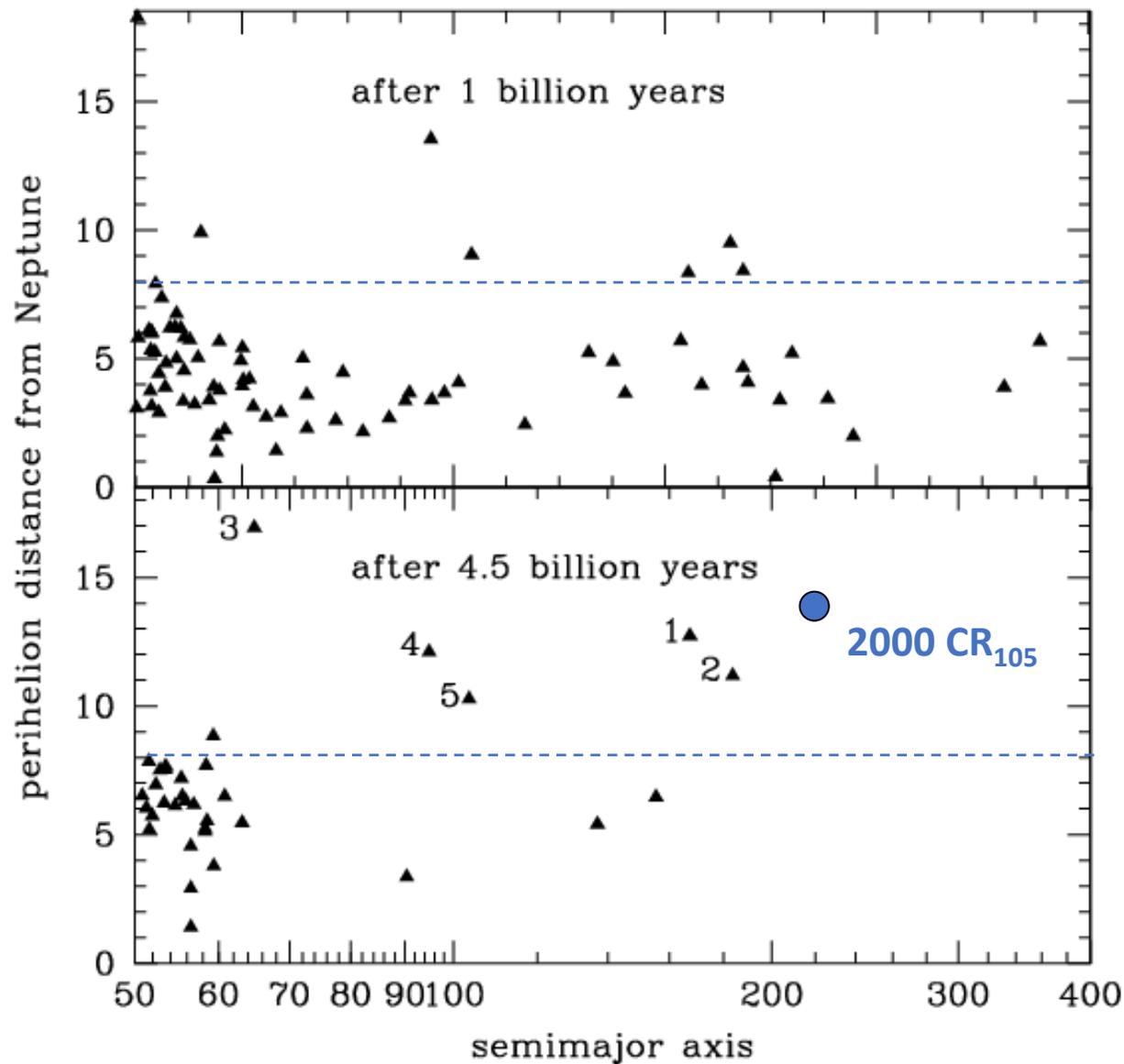




# Les disques dispersé et fossilisé comme extensions de la population chaude

Focus sur le disque dispersé et le disque fossilisé (Gomes, 2003, *Earth, Moon and Planets*)

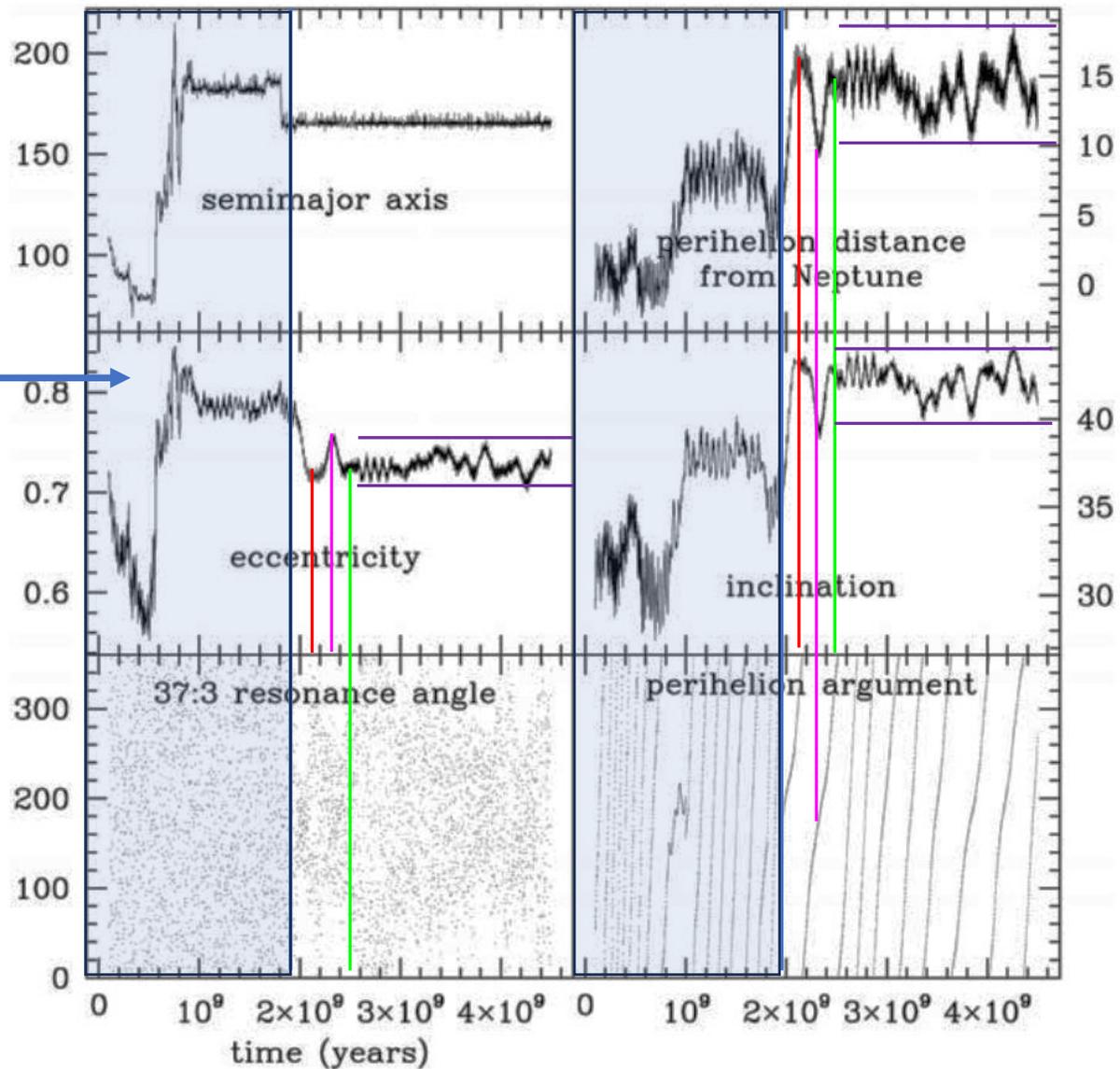
Les objets plus distants, avec  $q > 45$  ua (comme Sedna), nécessitent l'action d'un amas stellaire lors de leur éjection, ou de la planète IX.





# Capture d'un objet du disque fossilisé

Évolution  
typique du  
disque dispersé



Gomes, 2003, *Earth, Moon and Planets*



## Tous les problèmes sont résolus? Le diable est dans les détails

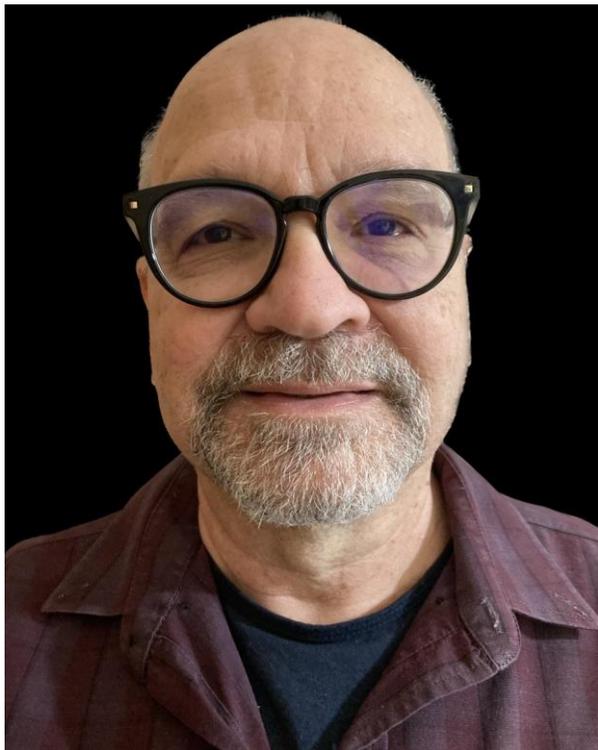
Deux problèmes restaient ouverts:

1. Les planètes se forment sur des orbites circulaires et coplanaires et la migration induite par les planétésimaux n'excite pas leurs excentricités et inclinaisons. Pourquoi alors les excentricités de Jupiter, Saturne et Uranus peuvent atteindre 0.06, 0.08 et 0.08, et les inclinaisons mutuelles  $\sim 2^\circ$ ?
2. En 2003, on pensait que la Lune avait subi un bombardement soudain  $\sim 500$  Ma après sa formation, indice que quelque chose de violent s'est passé dans le Système solaire à ce moment-là\*. Or, la migration induite par les planétésimaux, étant régulière, ne permet pas de l'expliquer. [*“Until you explain the terminal lunar cataclysm you have not fully explained the evolution of the Solar system”* C. Köberl, EKB workshop (Antofagasta, Chile, 2003)]

\*Ce n'est plus l'interprétation aujourd'hui. Voir Leçon N. 6



# Génèse du modèle de Nice



Rodney Gomes, Observatorio Nacional, Rio de Janeiro



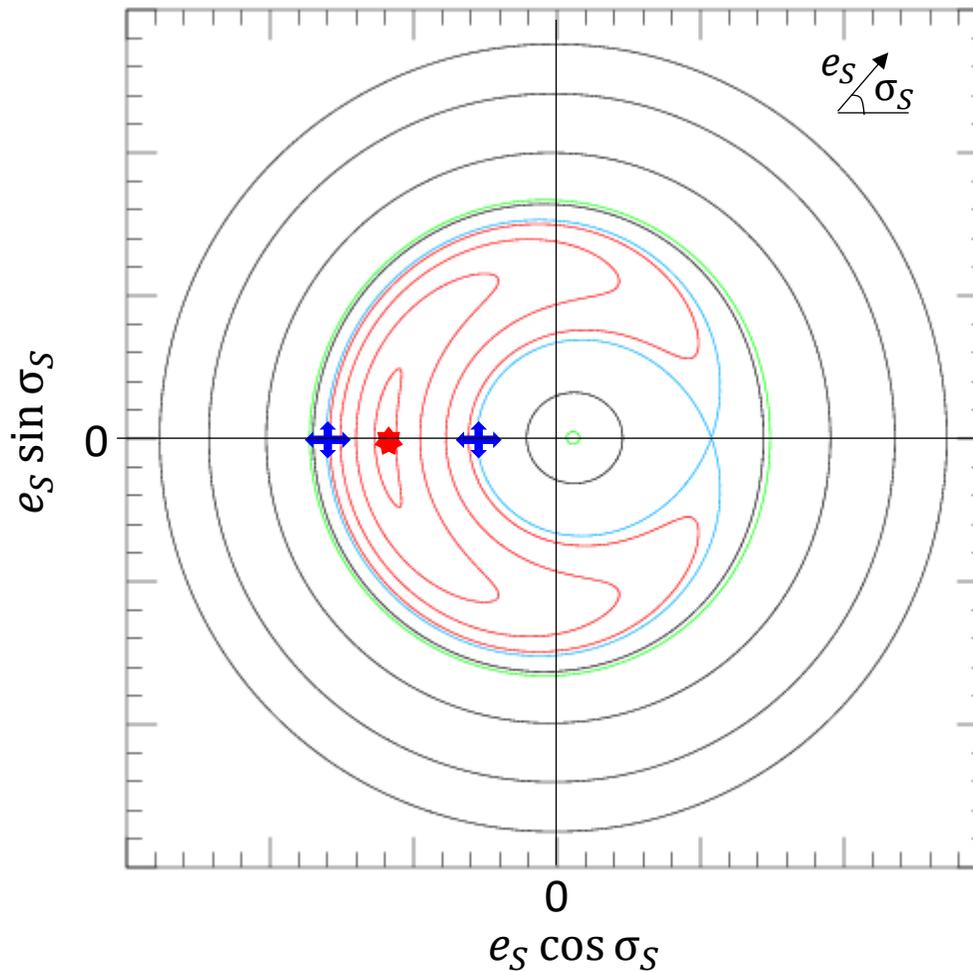
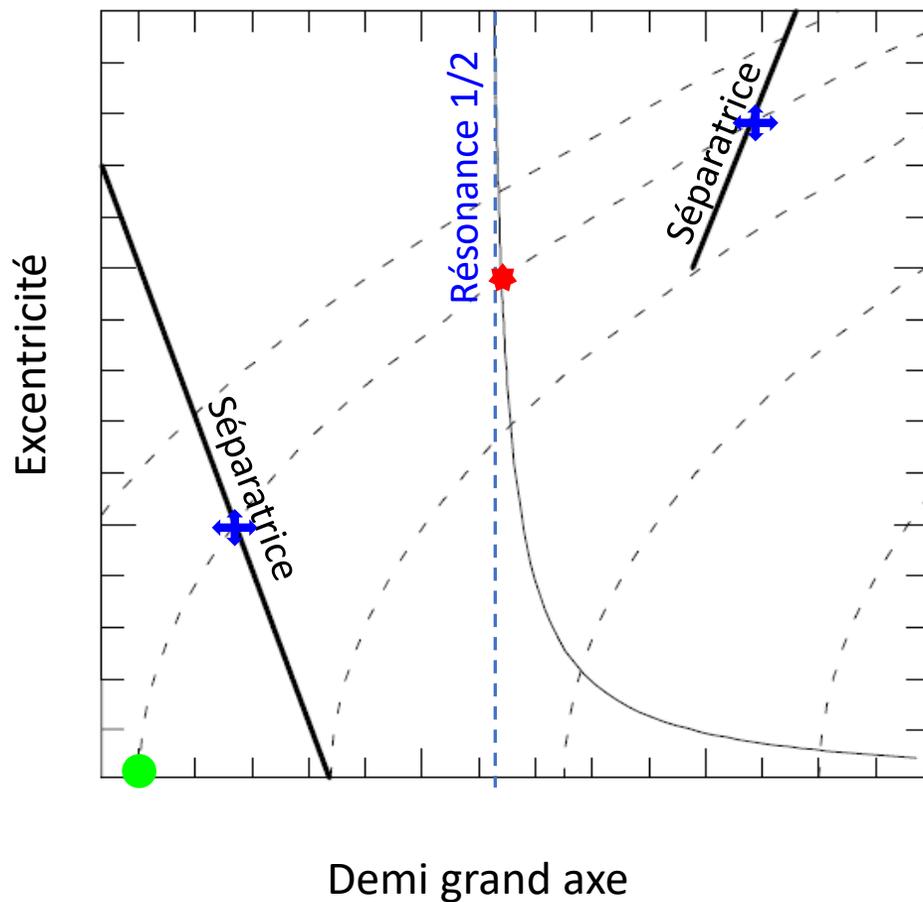
Harold Levison, SWRI, Boulder, Colorado



Kleomenis Tsiganis, Marie-Curie Post. Doc



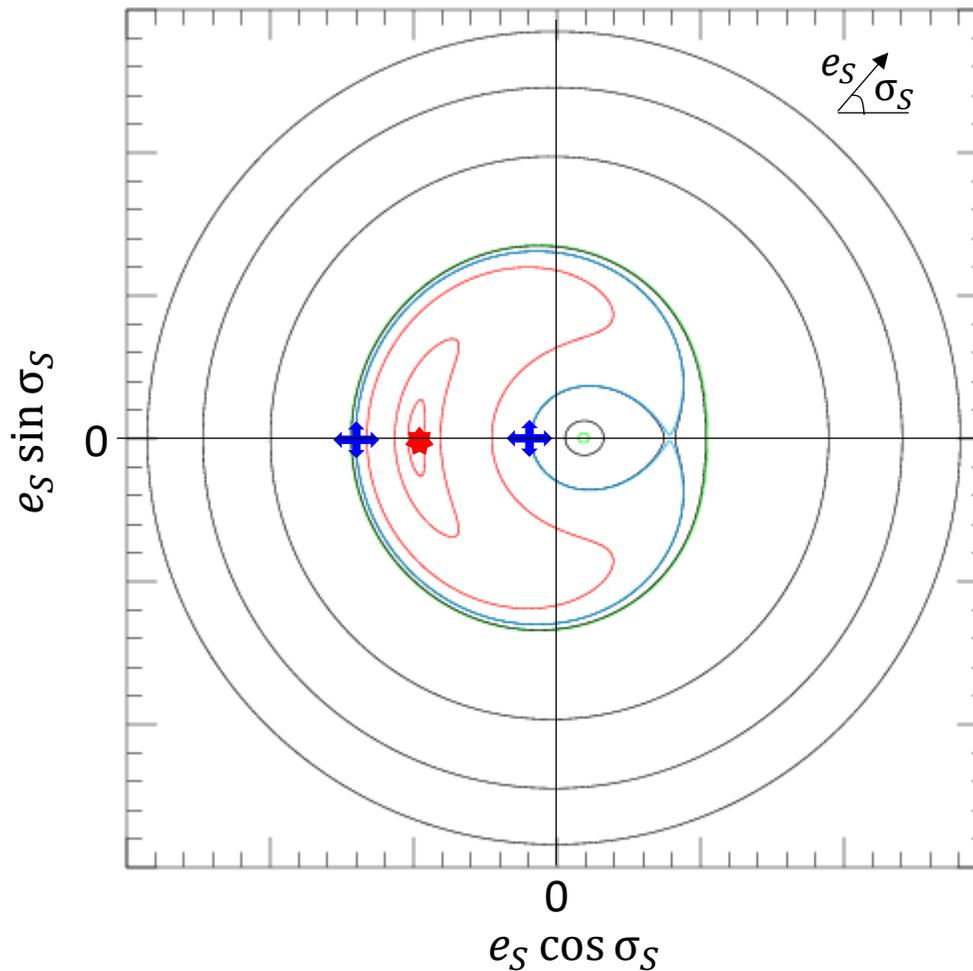
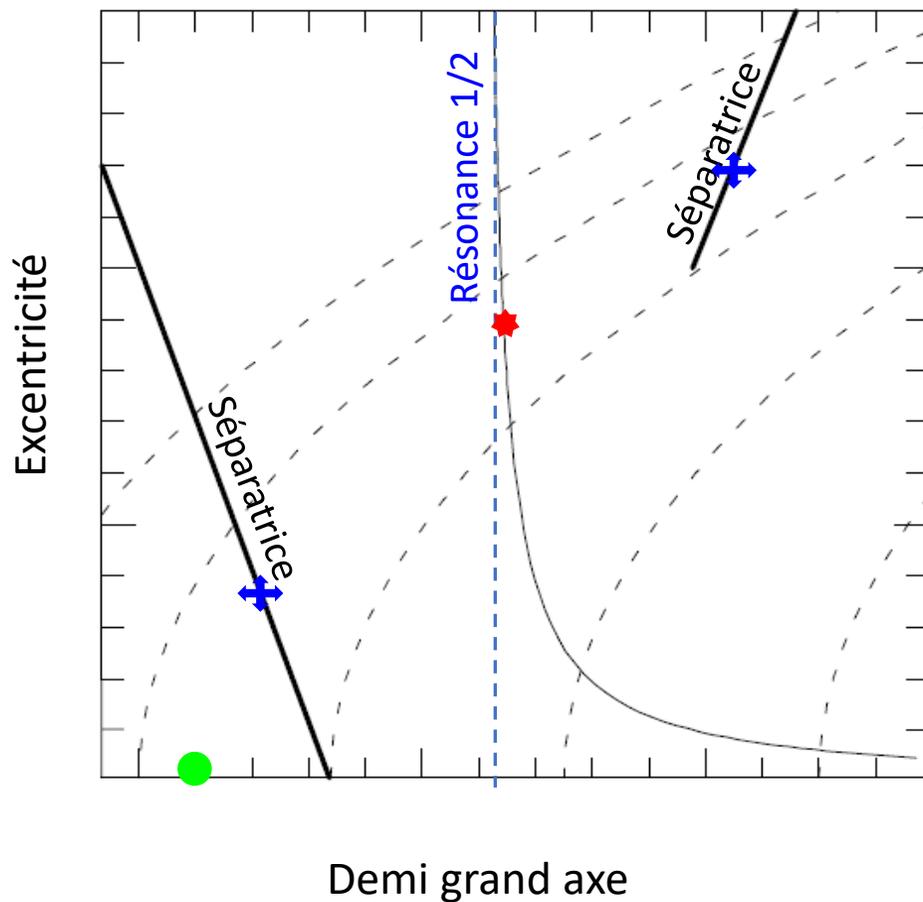
# Excitation de l'excentricité pendant la traversée d'une résonance



$$\sigma_s = 2\lambda_s - \lambda_J - \varpi_s$$



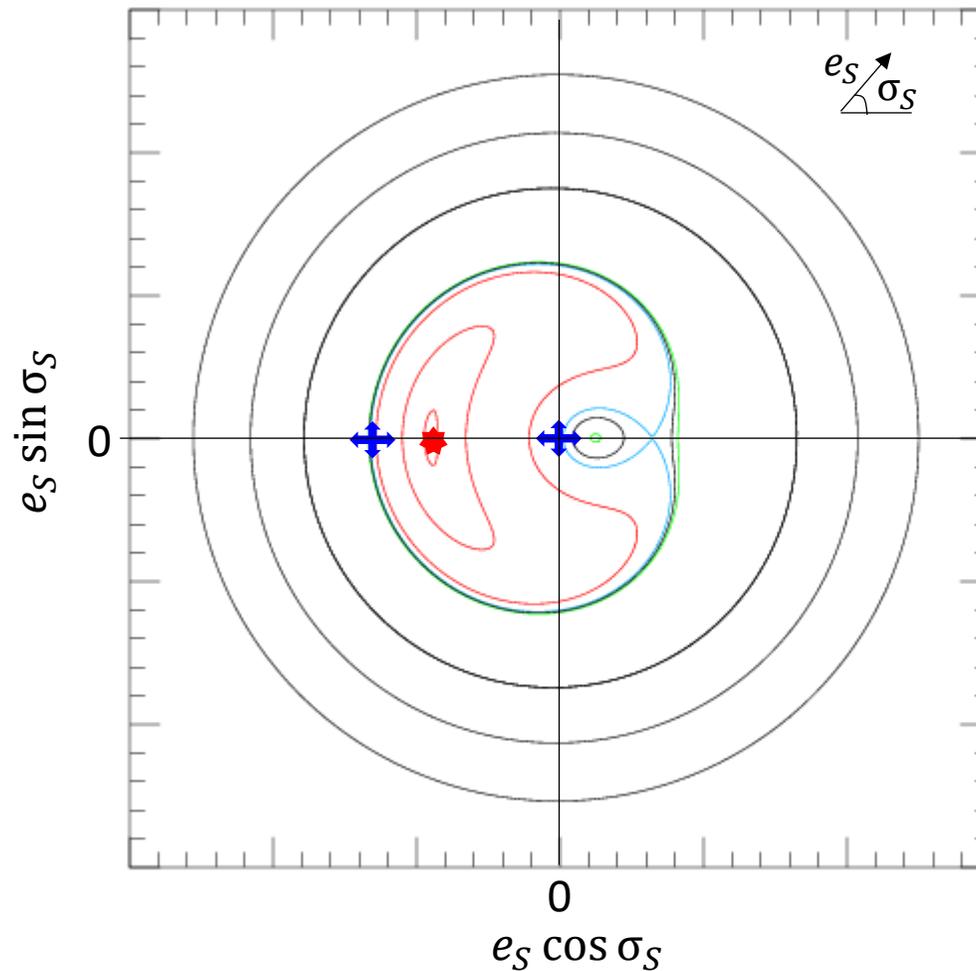
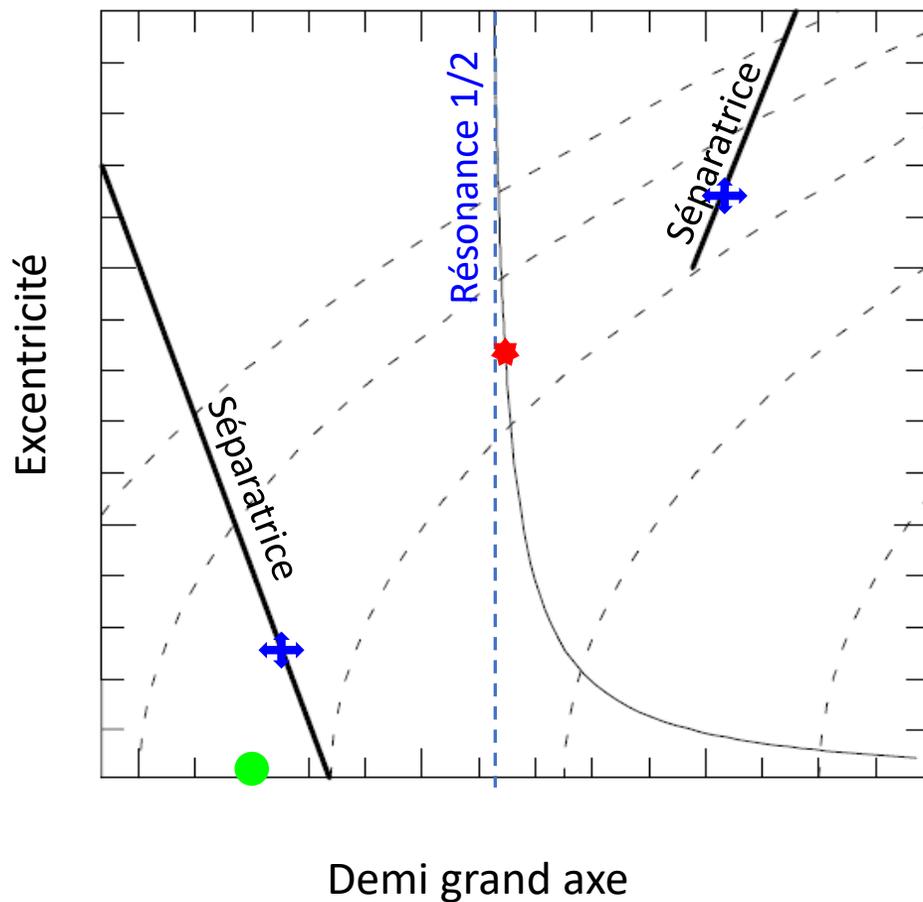
# Excitation de l'excentricité pendant la traversée d'une résonance



$$\sigma_S = 2\lambda_S - \lambda_J - \varpi_S$$



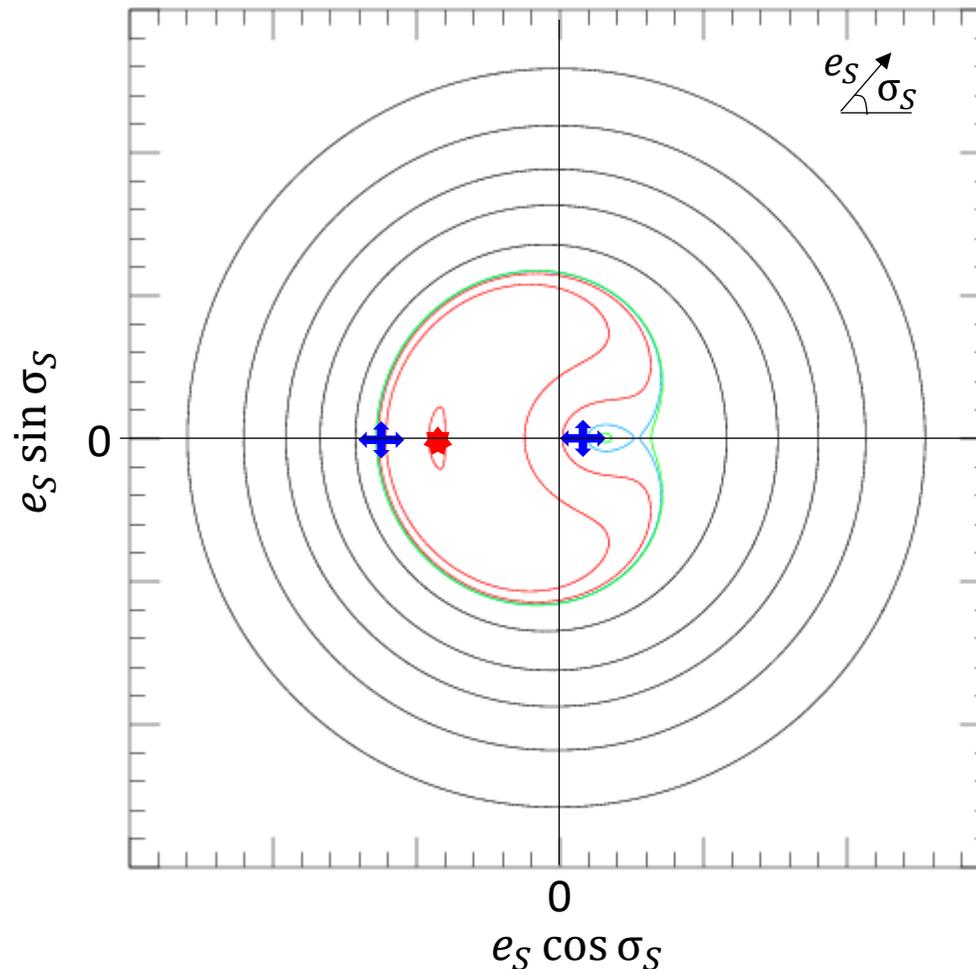
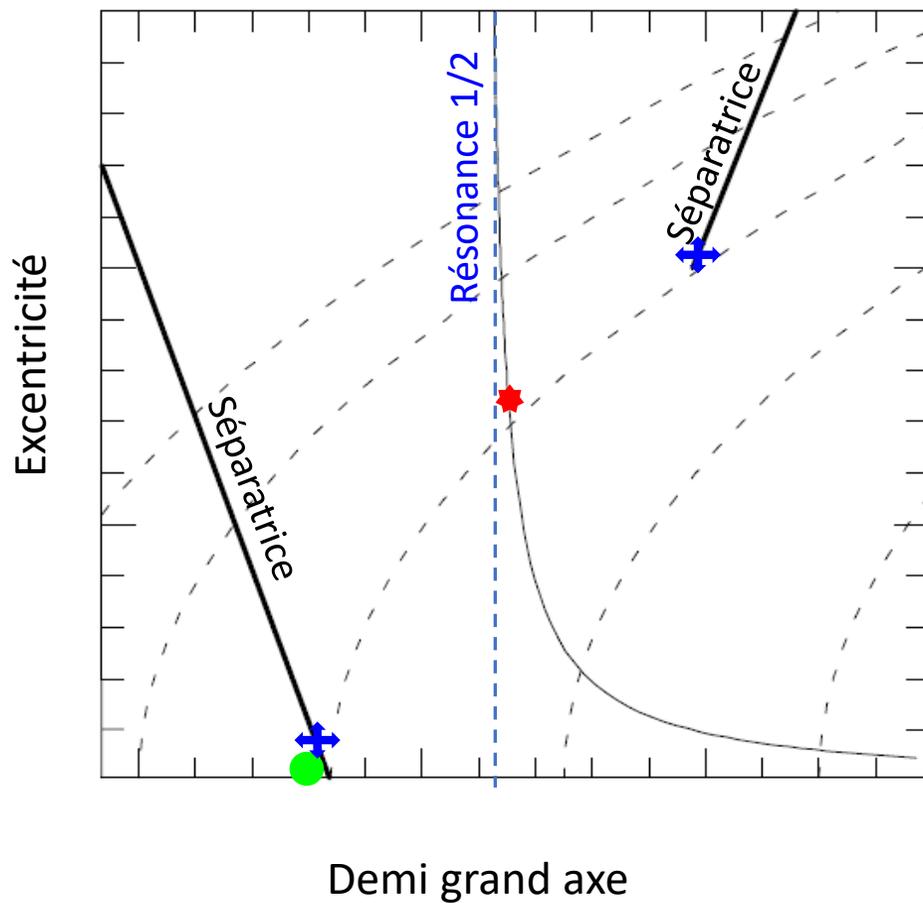
# Excitation de l'excentricité pendant la traversée d'une résonance



$$\sigma_S = 2\lambda_S - \lambda_J - \varpi_S$$



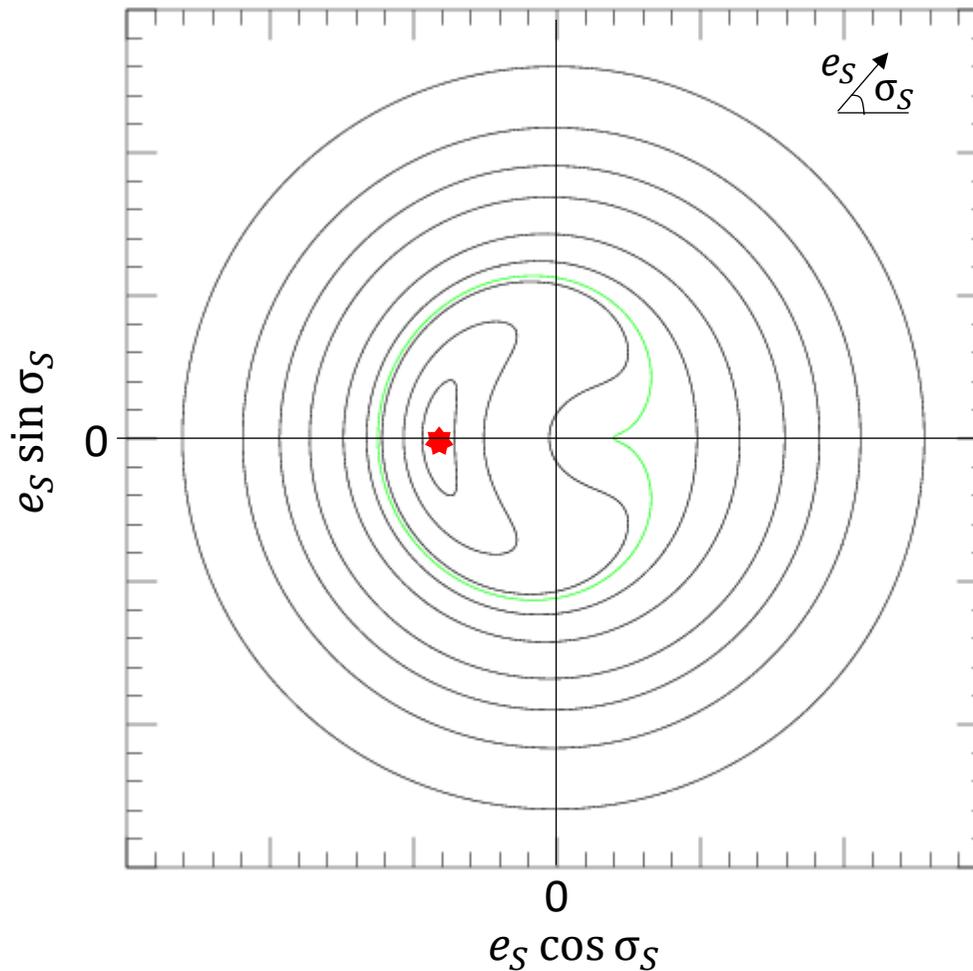
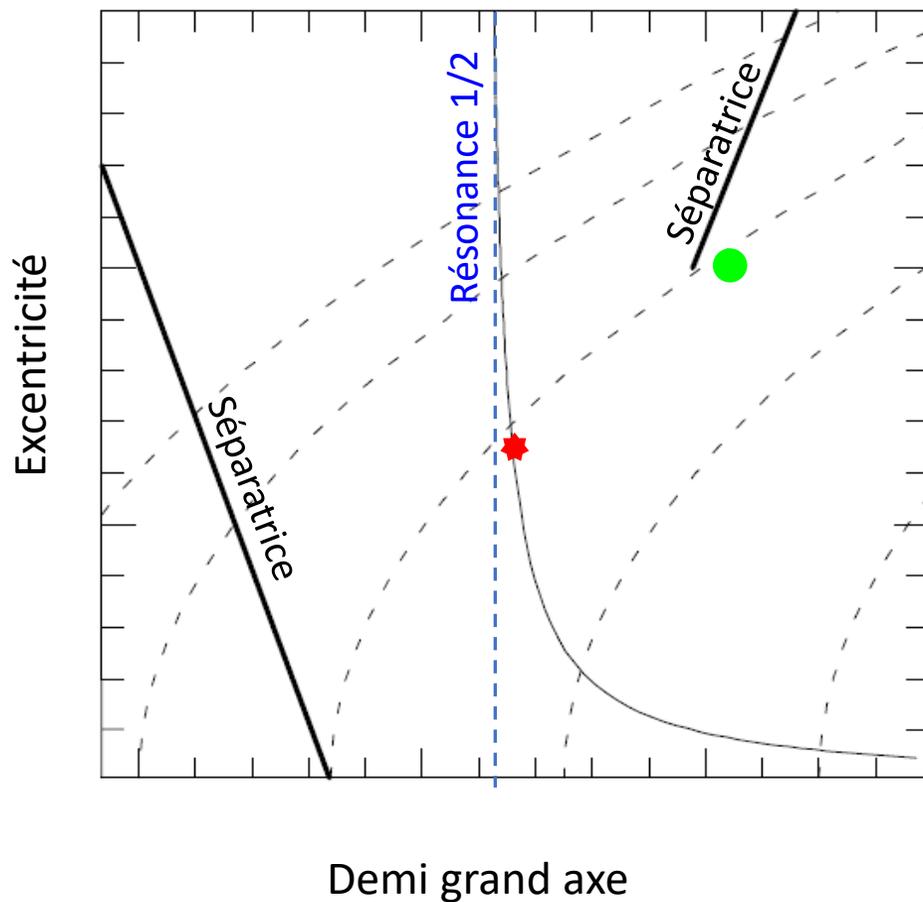
# Excitation de l'excentricité pendant la traversée d'une résonance



$$\sigma_S = 2\lambda_S - \lambda_J - \varpi_S$$

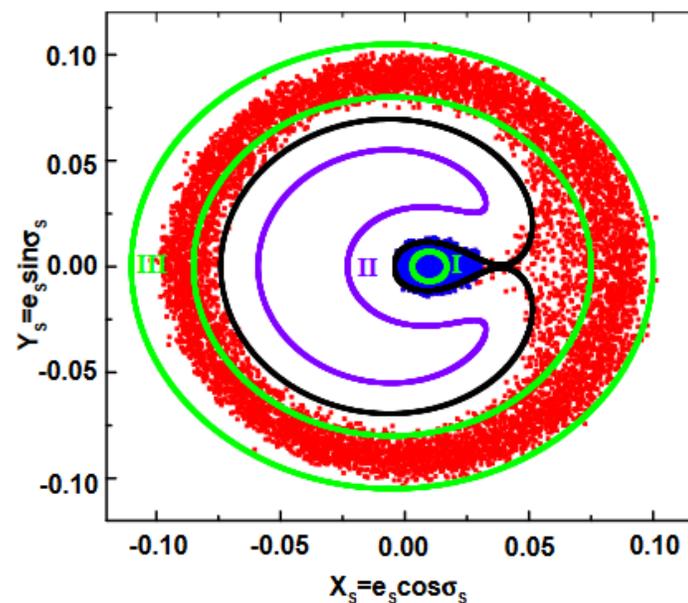
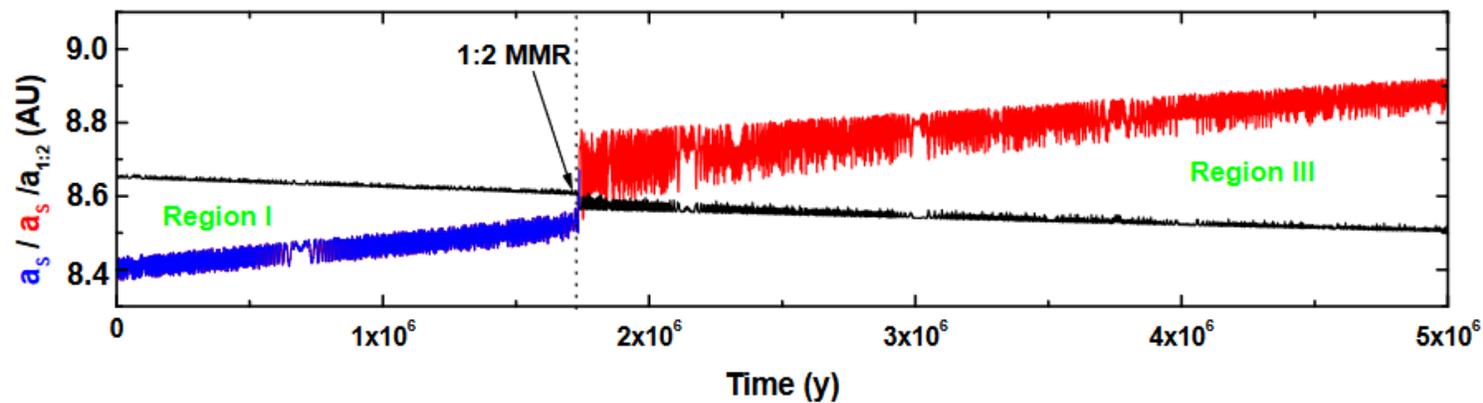


# Excitation de l'excentricité pendant la traversée d'une résonance



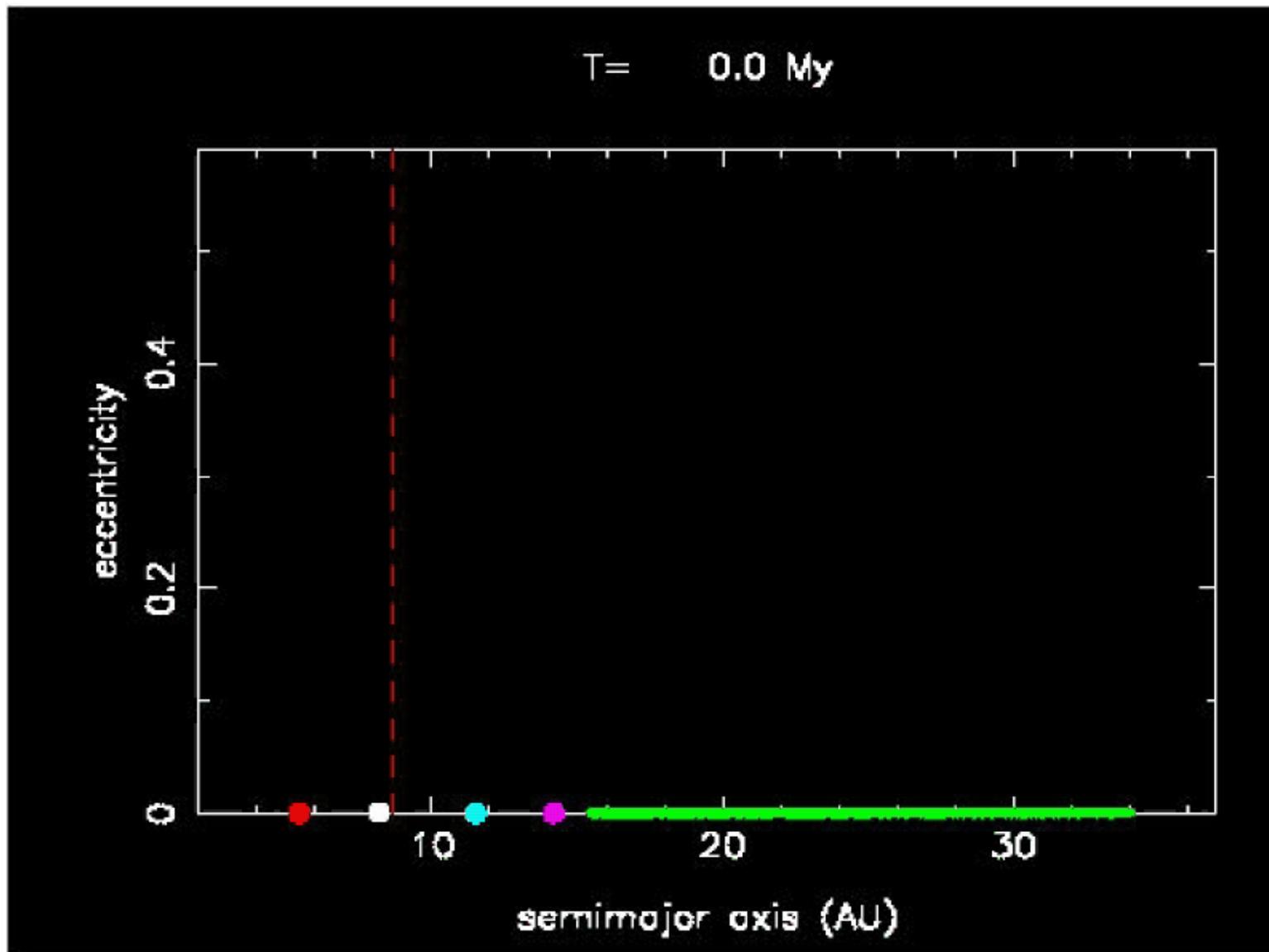


# Excitation de l'excentricité pendant la traversée d'une résonance





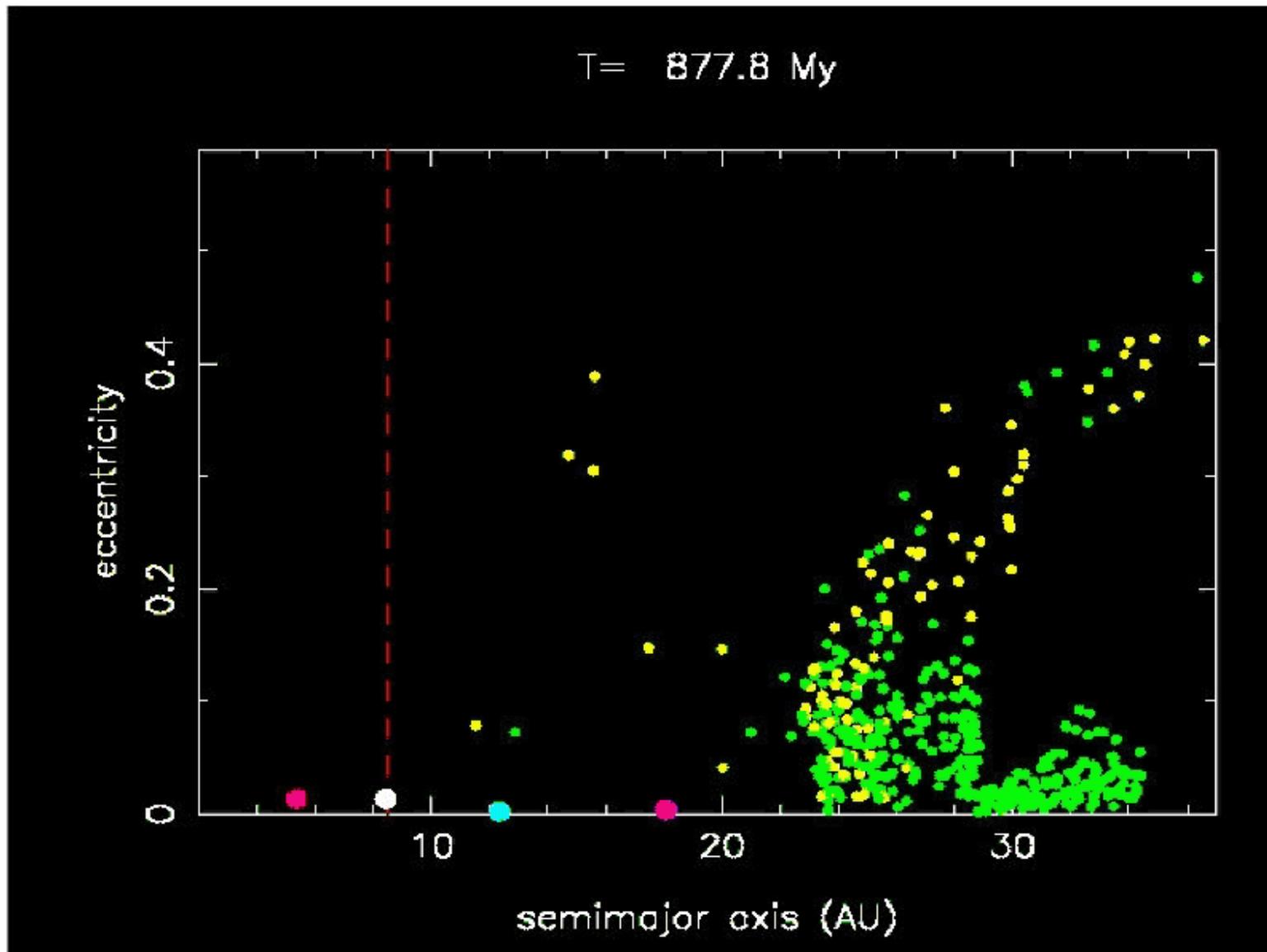
## Le modèle de Nice 1.0



Tsiganis et al., 2005  
Gomes et al., 2005



## Le modèle de Nice 1.0



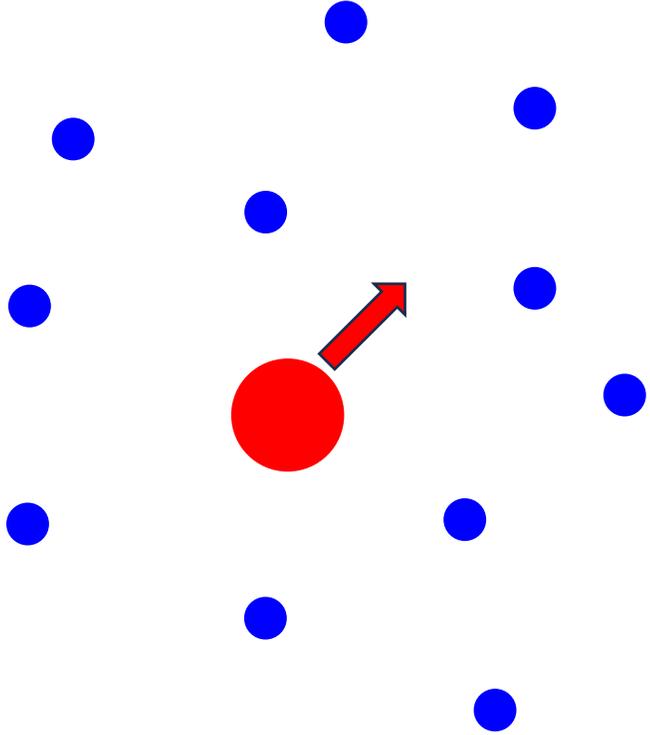
Tsiganis et al., 2005  
Gomes et al., 2005



# La friction dynamique (1/2)

Exemple: planète sur orbite excentrique dans un essaim de particules sur orbites circulaires

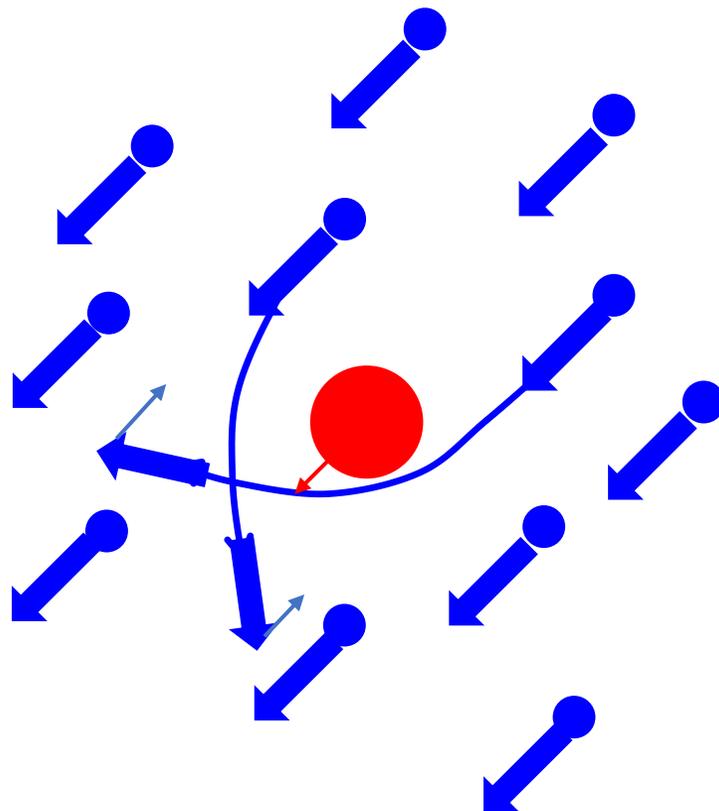
Repère des particules





## La friction dynamique (1/2)

Repère de la planète



Exemple: planète sur orbite excentrique dans un essaim de particules sur orbites circulaires

La vitesse relative entre la planète et les particules diminue

L'orbite de la planète devient plus circulaire. Celles des particules deviennent plus excentriques

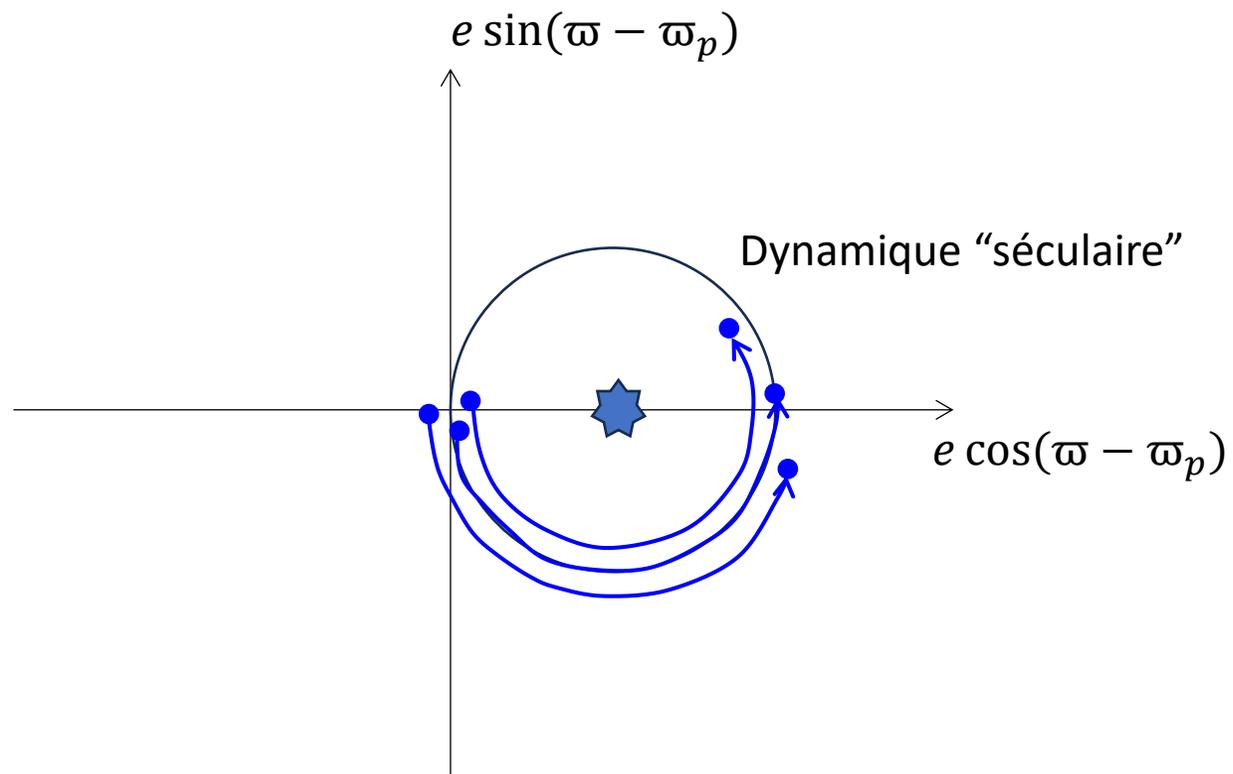
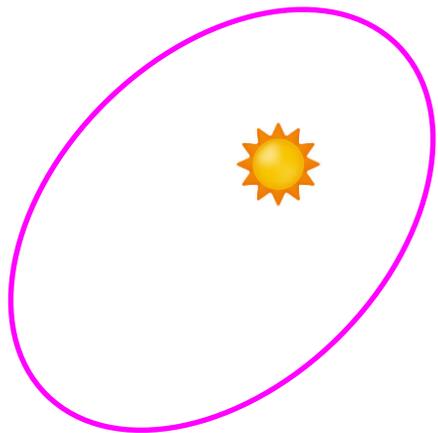
Un équilibre est atteint quand

$$M_p e_p^2 = \sum m_{part} e_{part}^2$$

Le principe d'équipartition est valable quand planètes et particules subissent des rencontres proches

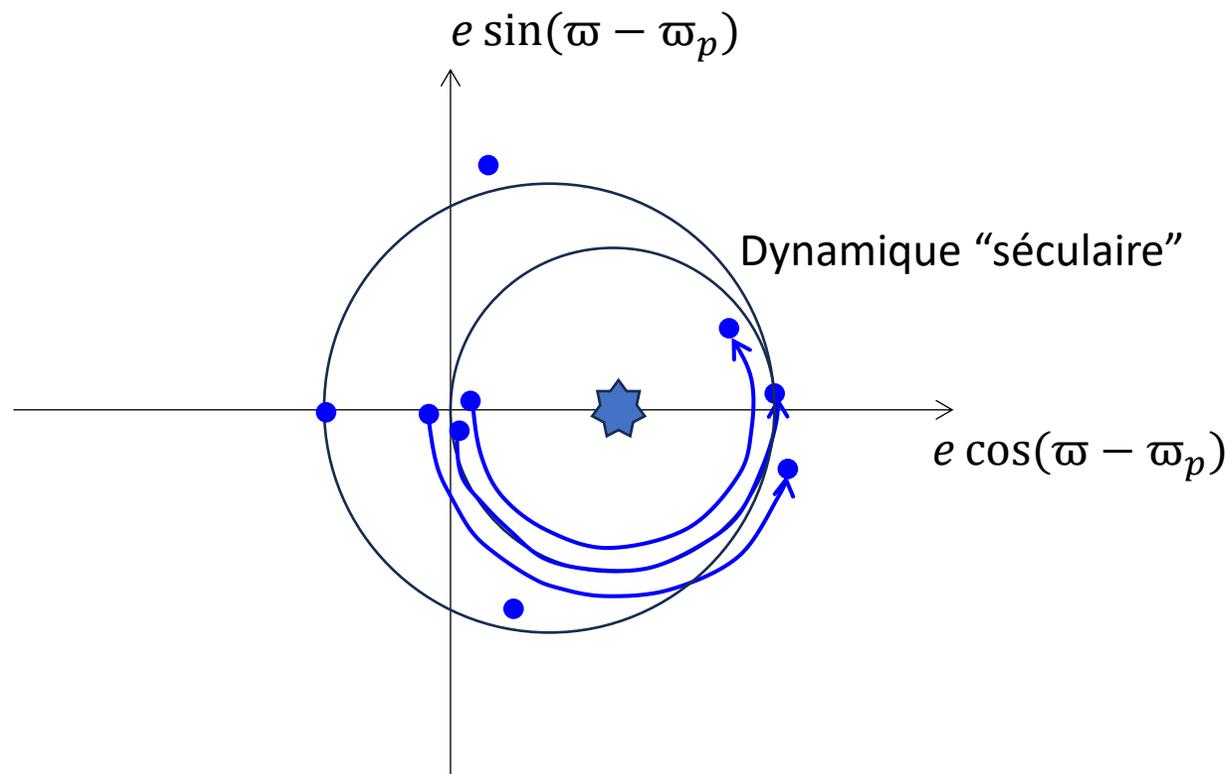
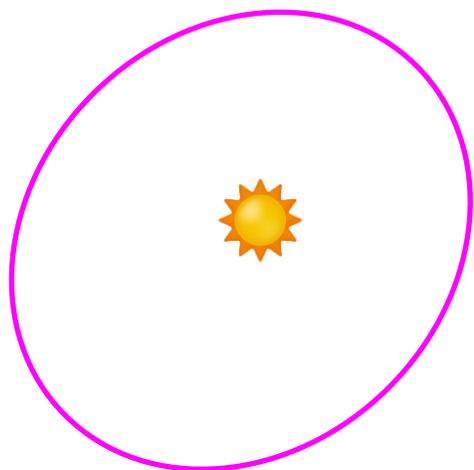


## La friction dynamique (2/2)





## La friction dynamique (2/2)

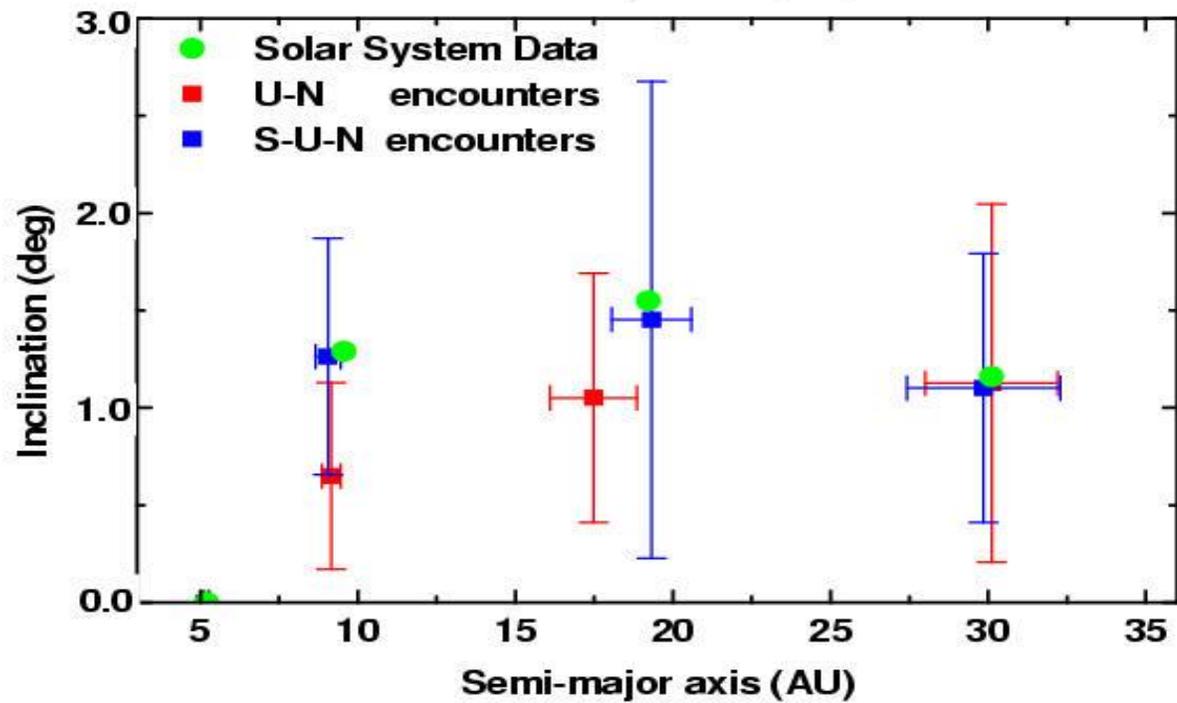
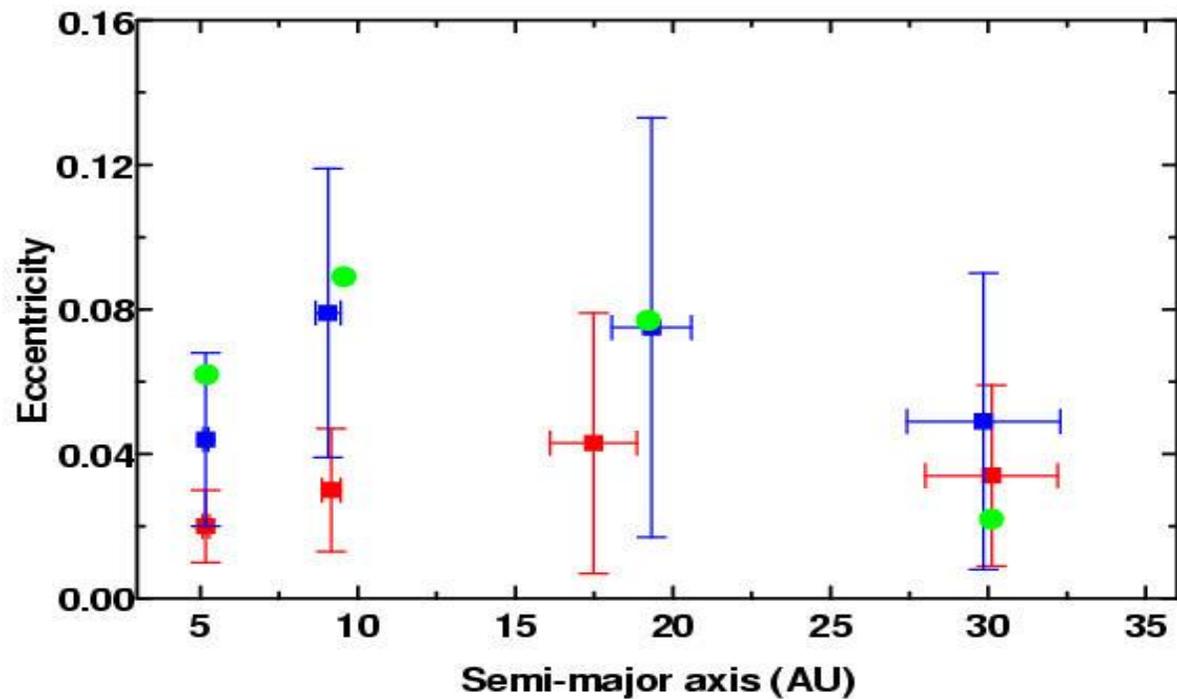


En principe l'effet est réversible: quand les particules diminuent leur excentricité orbitale, l'excentricité de l'orbite de la planète augment. Mais l'éparpillement des particules le long du cycle séculaire affaiblit cet effet

La composante "séculaire" de la friction dynamique s'exerce même en absence de rencontres proches



## Orbites finales des planètes à l'issue de l'instabilité



Tsiganis et al., 2005



Vol 435|26 May 2005|doi:10.1038/nature03539

**nature**

LETTERS

---

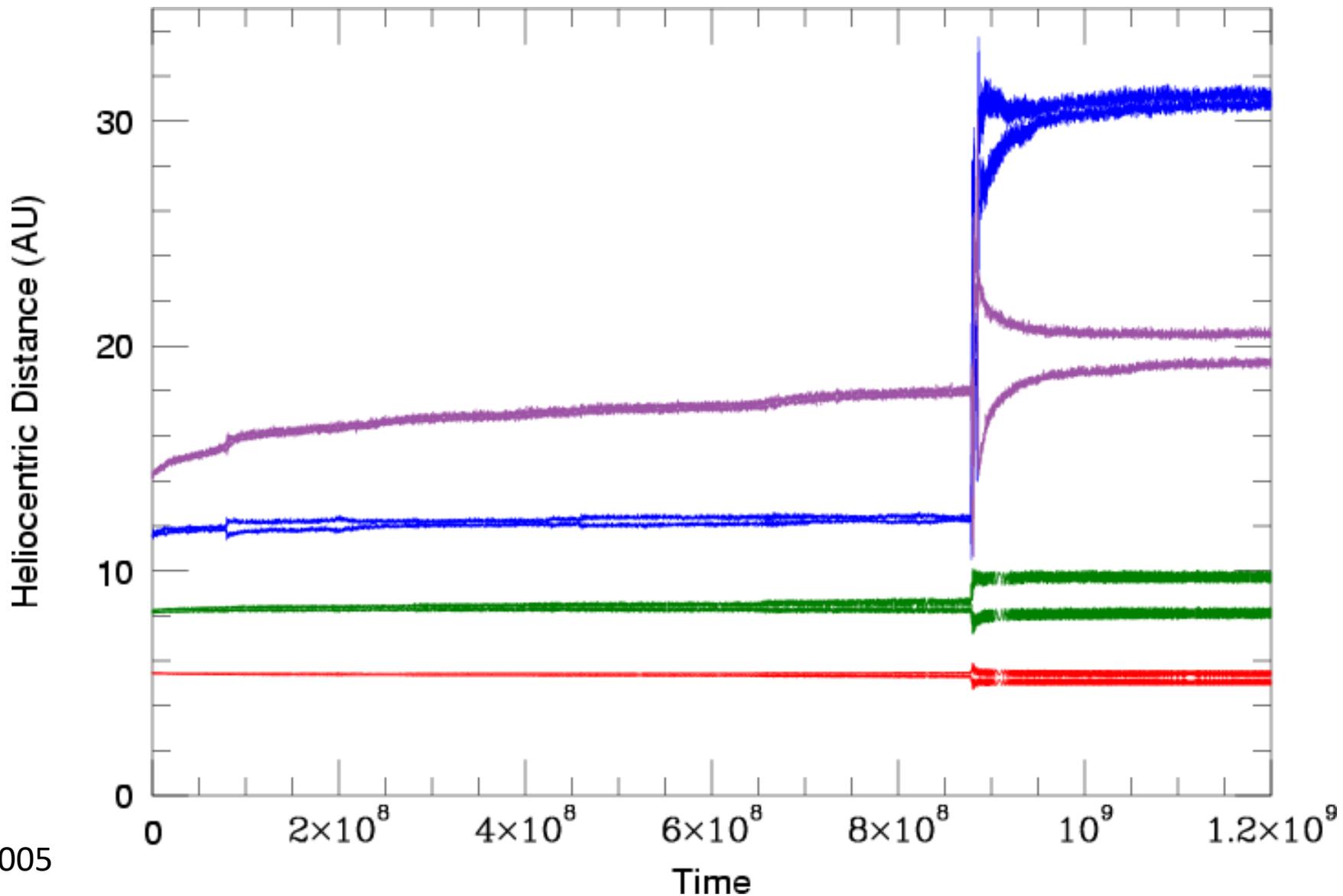
# Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System

K. Tsiganis<sup>1</sup>, R. Gomes<sup>1,2</sup>, A. Morbidelli<sup>1</sup> & H. F. Levison<sup>1,3</sup>



## Possibilité d'une instabilité "tardive"

Le délai du déclenchement de l'instabilité dépend de la distance initiale de Saturne à la résonance 1:2 avec Jupiter

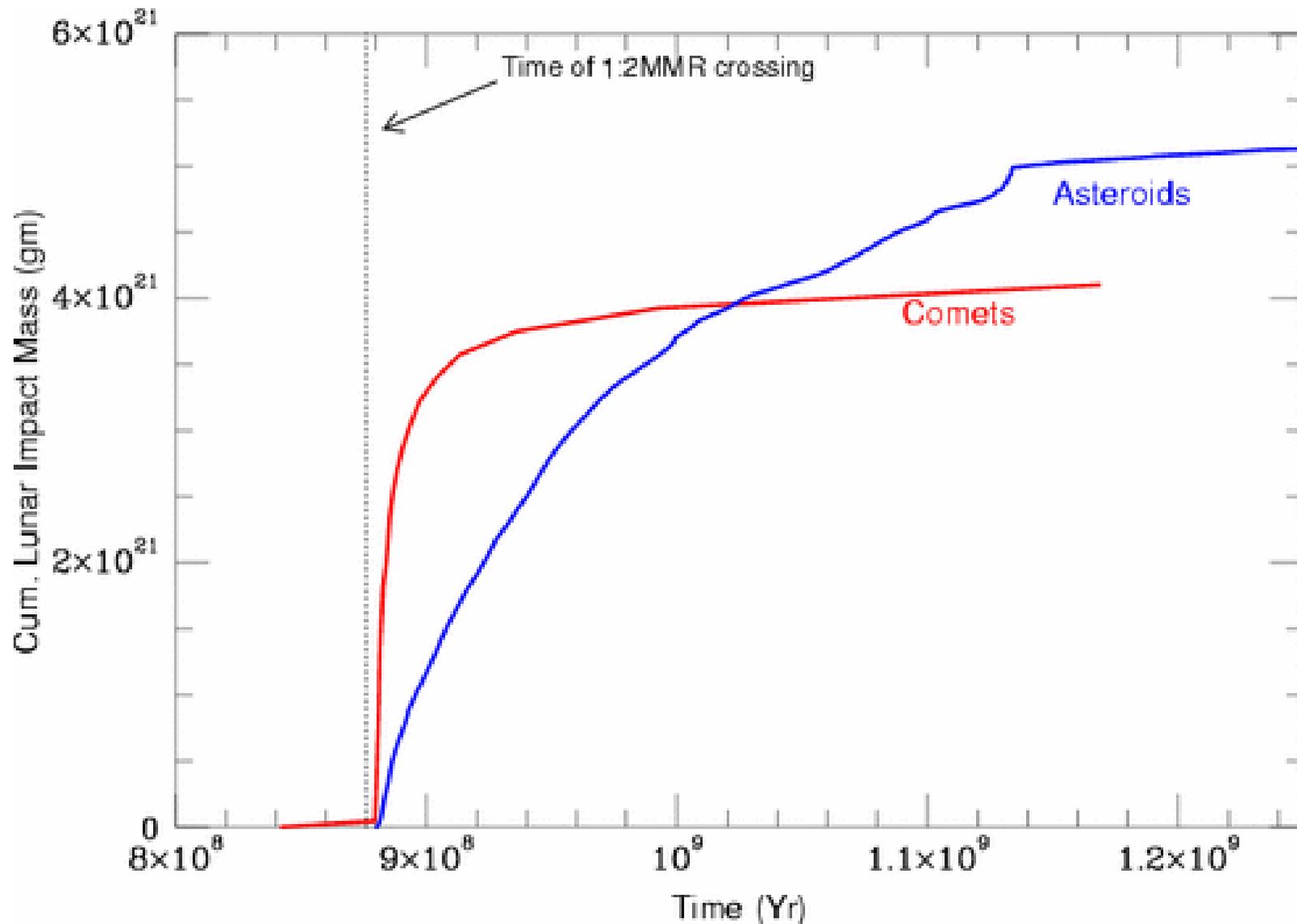


Gomes et al., Nature 2005



## Possibilité d'une instabilité "tardive"

C'est au déclenchement de l'instabilité qu'un déluge d'astéroïdes et comètes s'abat sur les planètes telluriques



Gomes et al., Nature 2005



nature

Vol 435|26 May 2005|doi:10.1038/nature03676

## LETTERS

---

# Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets

R. Gomes<sup>1,2</sup>, H. F. Levison<sup>2,3</sup>, K. Tsiganis<sup>2</sup> & A. Morbidelli<sup>2</sup>



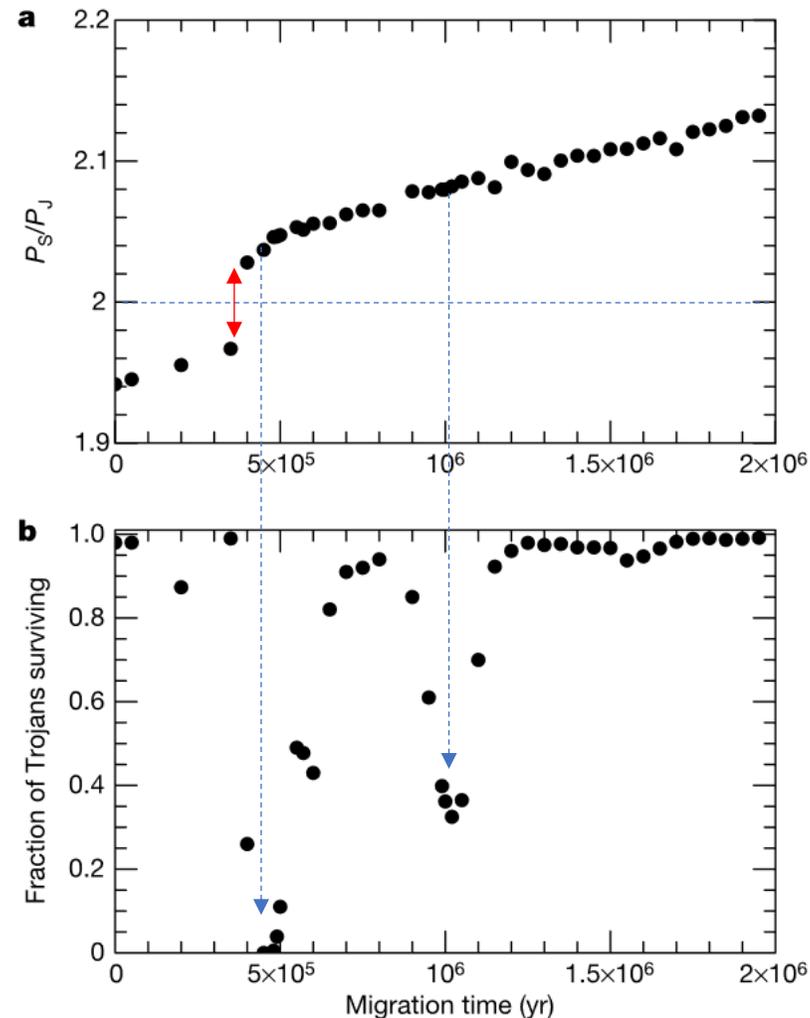
## L'instabilité planétaire et les Troyens de Jupiter

Lors de la migration de Jupiter et Saturne à travers de la résonance 2/1, les Troyens de Jupiter deviennent instables (à 2 reprises)

Ces phases d'instabilité sont dues à des résonance entre la période de libration des Troyens et la période de  $\lambda_J - 2\lambda_S$

Si Jupiter avait des Troyens "primordiaux" il les aurait perdus.

D'autre part, si les Troyens de Jupiter étaient primordiaux, leurs inclinaisons ne s'expliquent pas



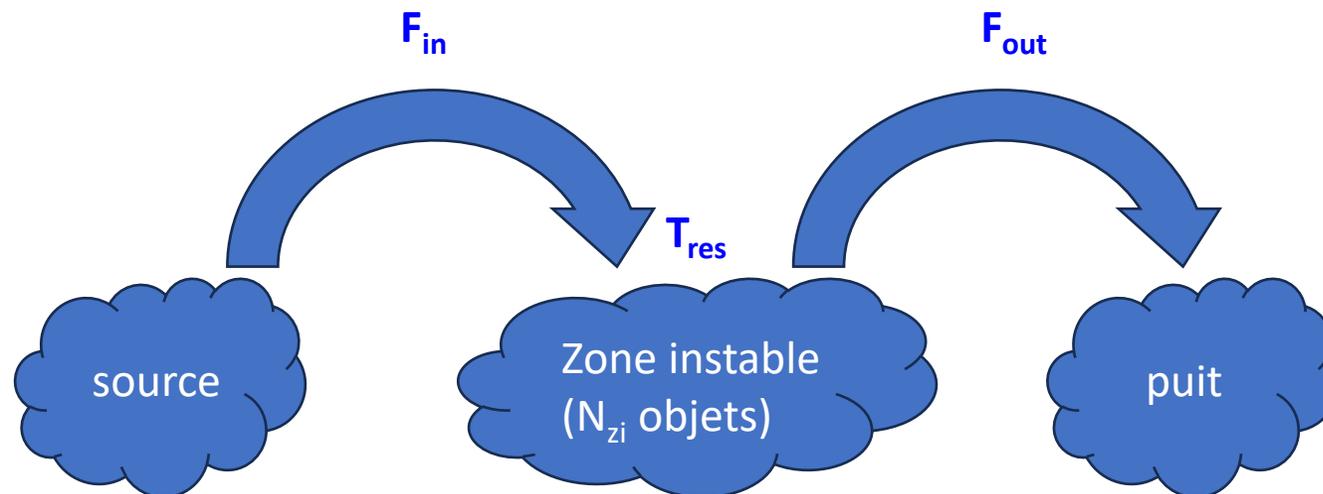


## Instabilité et état stationnaire

Dans une région dynamiquement instable, s'il y a une source d'objets, une population en état stationnaire se forme...

Si cette région devient subitement stable, la population en état stationnaire se fossilise. Plus d'objets ne rentrent ni ne sortent. Ceux qui se trouvent dans la région lors de sa transition à la stabilité restent capturés.

Capture Chaotique



En état stationnaire:  $F_{in} = F_{out}$  et  $N_{zi} = F_{in} \times T_{res}$

Exemples:

Robinet  
Disque dispersé  
Planétésimaux

Baignoire  
Comètes Jupiter  
Troyens

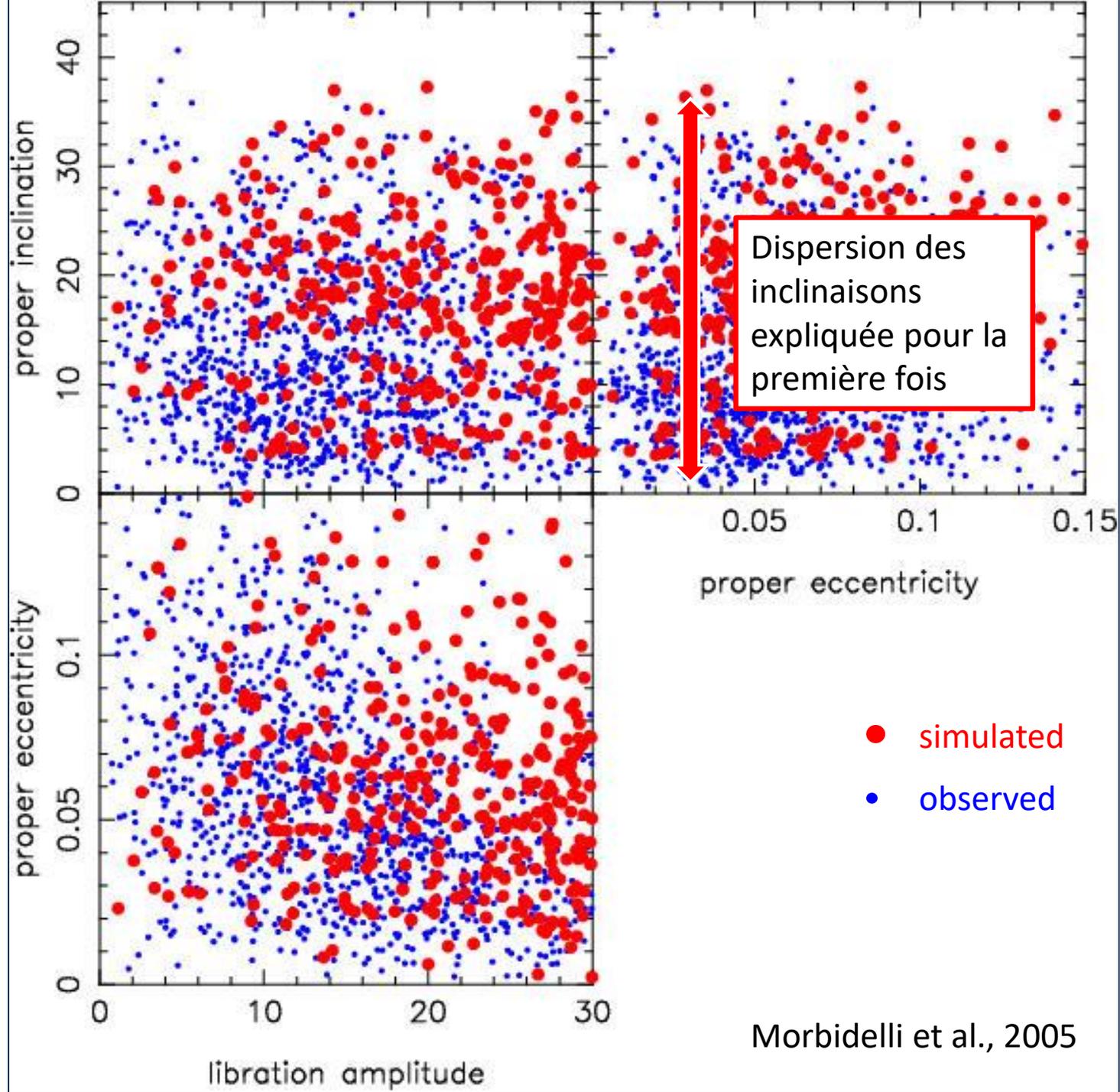
Siphon  
Ejection  
Ejection



## Distribution des Troyens capturés

Population capturée prédite:  
entre  $4 \times 10^{-6}$  et  $3 \times 10^{-5} M_E$  selon  
la vitesse de migration des  
planètes (rapidité de la  
transition instable  $\rightarrow$  stable)

Population estimée à partir des  
observations:  
 $1.1 \times 10^{-5} M_E$



Morbidelli et al., 2005



nature

Vol 435|26 May 2005|doi:10.1038/nature03540

# LETTERS

---

## **Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System**

A. Morbidelli<sup>1</sup>, H. F. Levison<sup>1,2</sup>, K. Tsiganis<sup>1</sup> & R. Gomes<sup>1,3</sup>

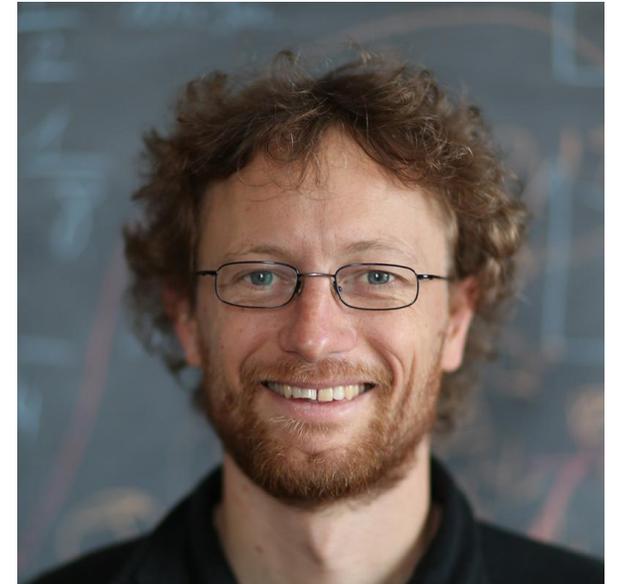


## Les orbites initiales des planètes

Dans le modèle de Nice de 2005 elles sont arbitraires (pourvu que Jupiter et Saturne soient plus près de leur résonance mutuelle 1/2)

En réalité les orbites des planètes à la disparition du disque de gaz devaient être le résultat de leur évolution précédente pendant la phase gazeuse du disque -> MIGRATION!

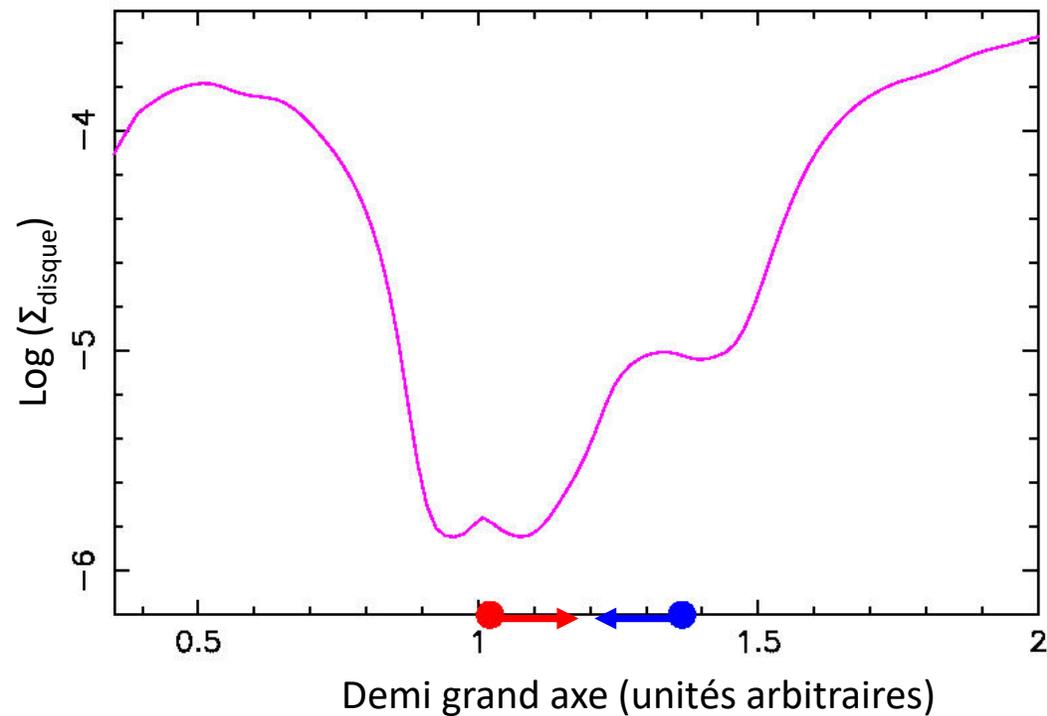
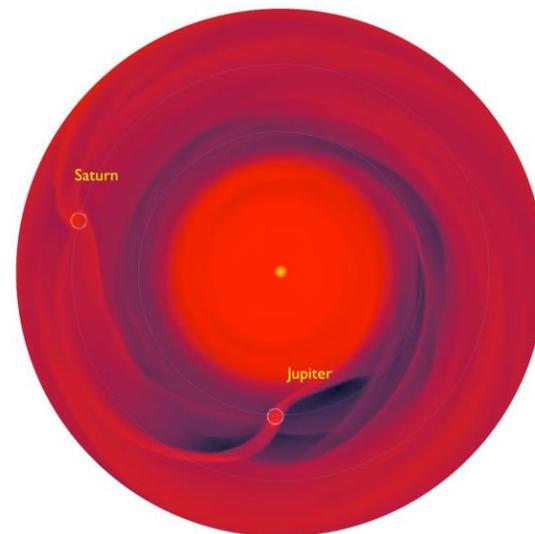
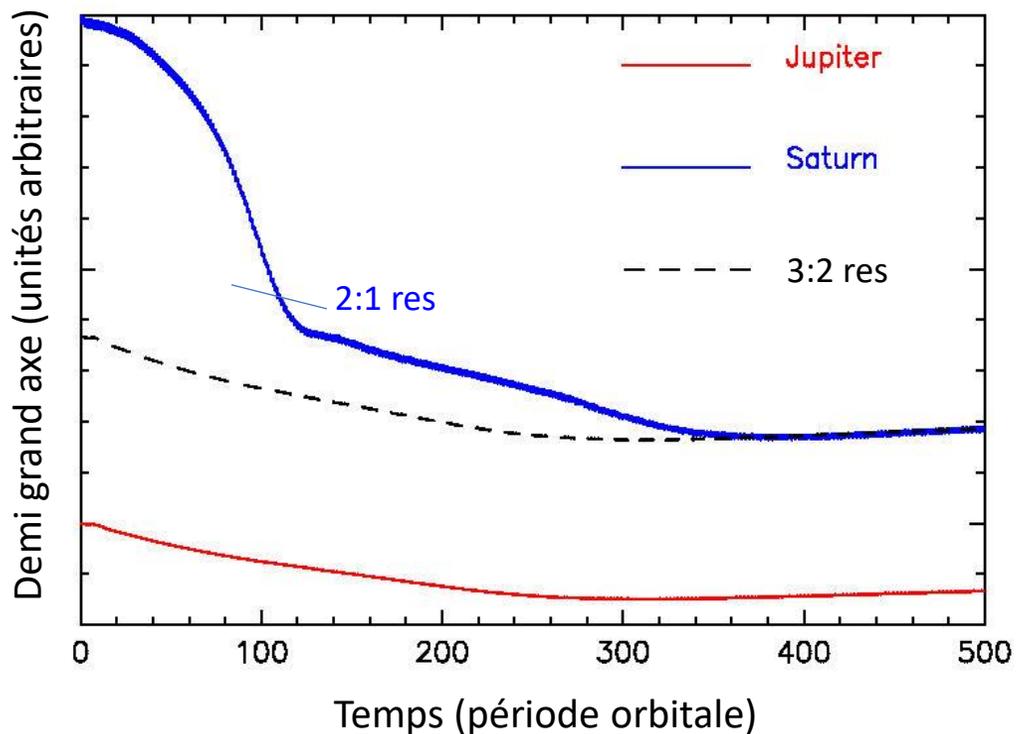
Une étude cohérente de la migration des planètes géantes s'imposait  
-> Thèse de Aurélien Crida (2003-2007)





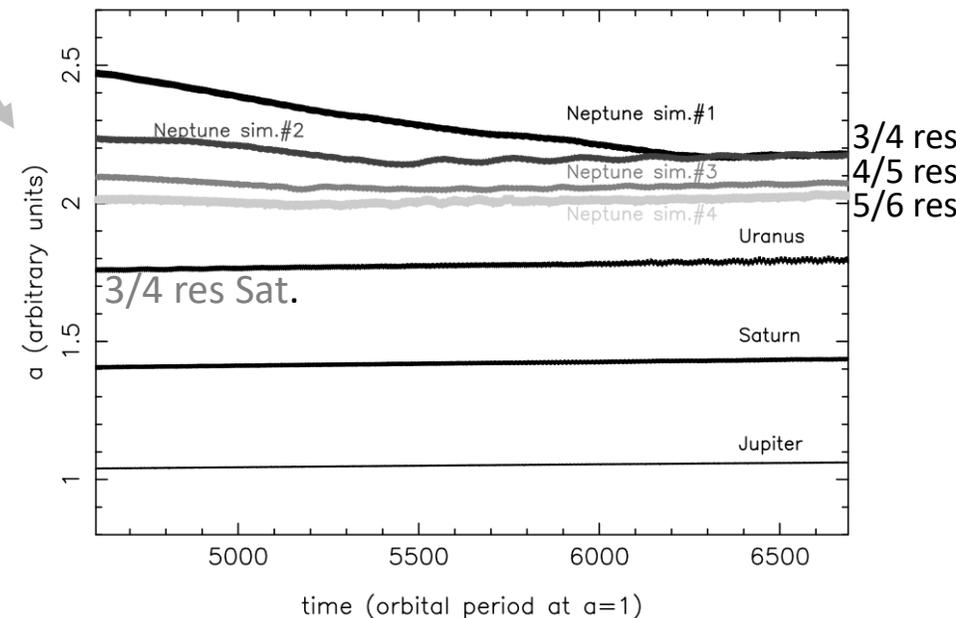
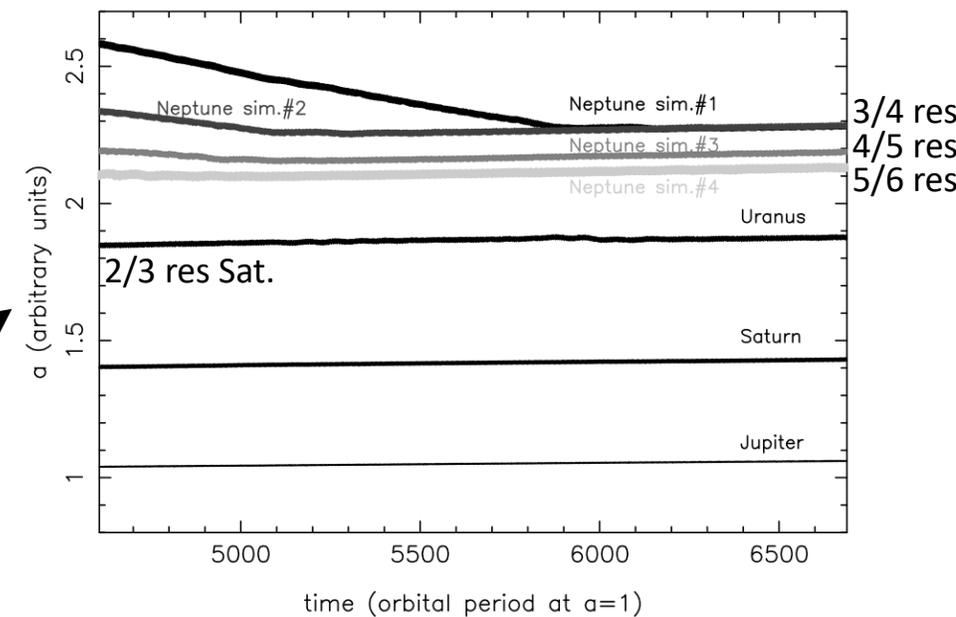
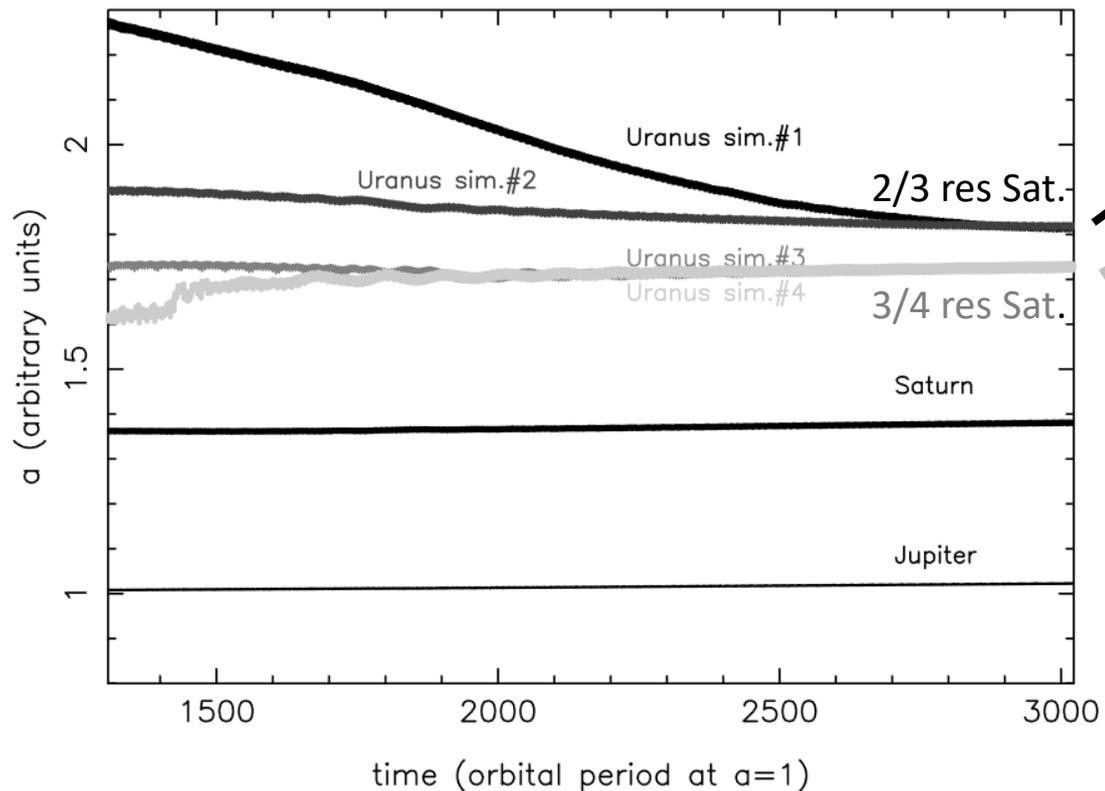
# La migration de Jupiter et Saturne

Migration de Jupiter et Saturne dans un disque visqueux  
(Masset et Snellgrove, 2000; Crida et Morbidelli, 2007)





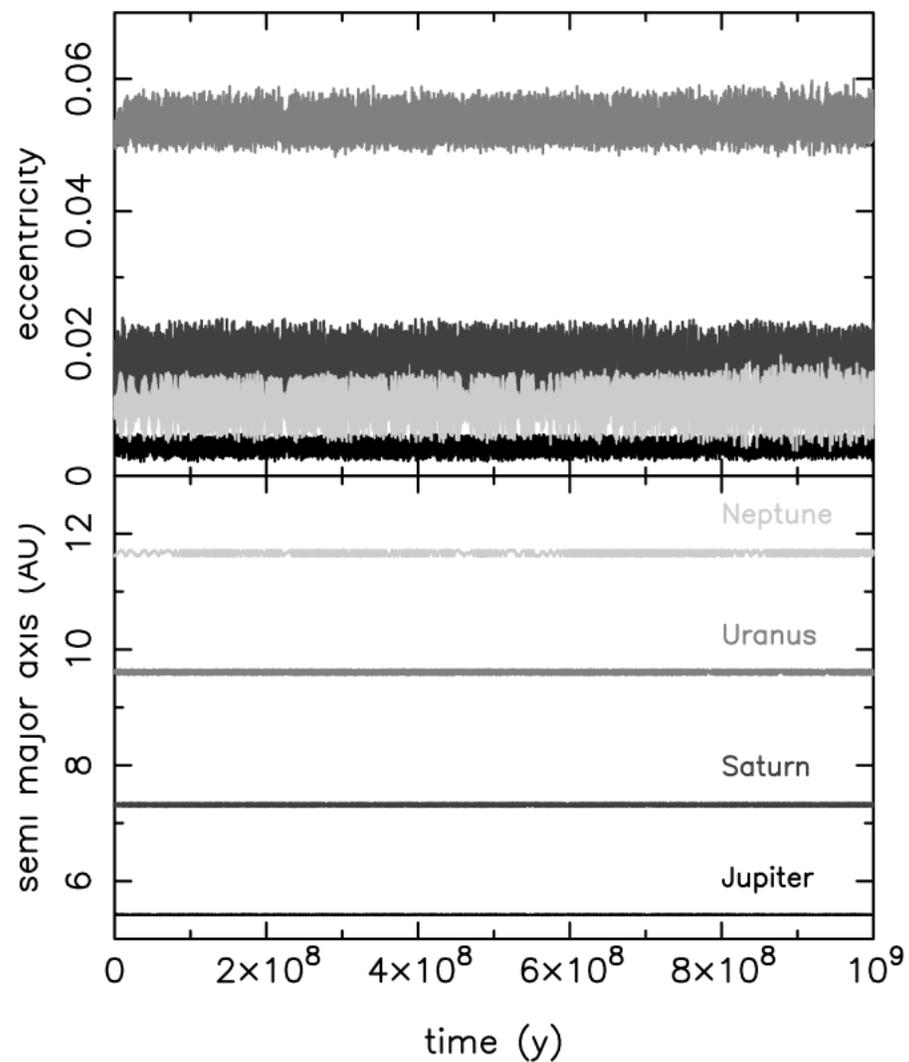
# La migration d'Uranus et Neptune



Morbideli, Tsiganis, Crida, Levison et Gomes, 2007



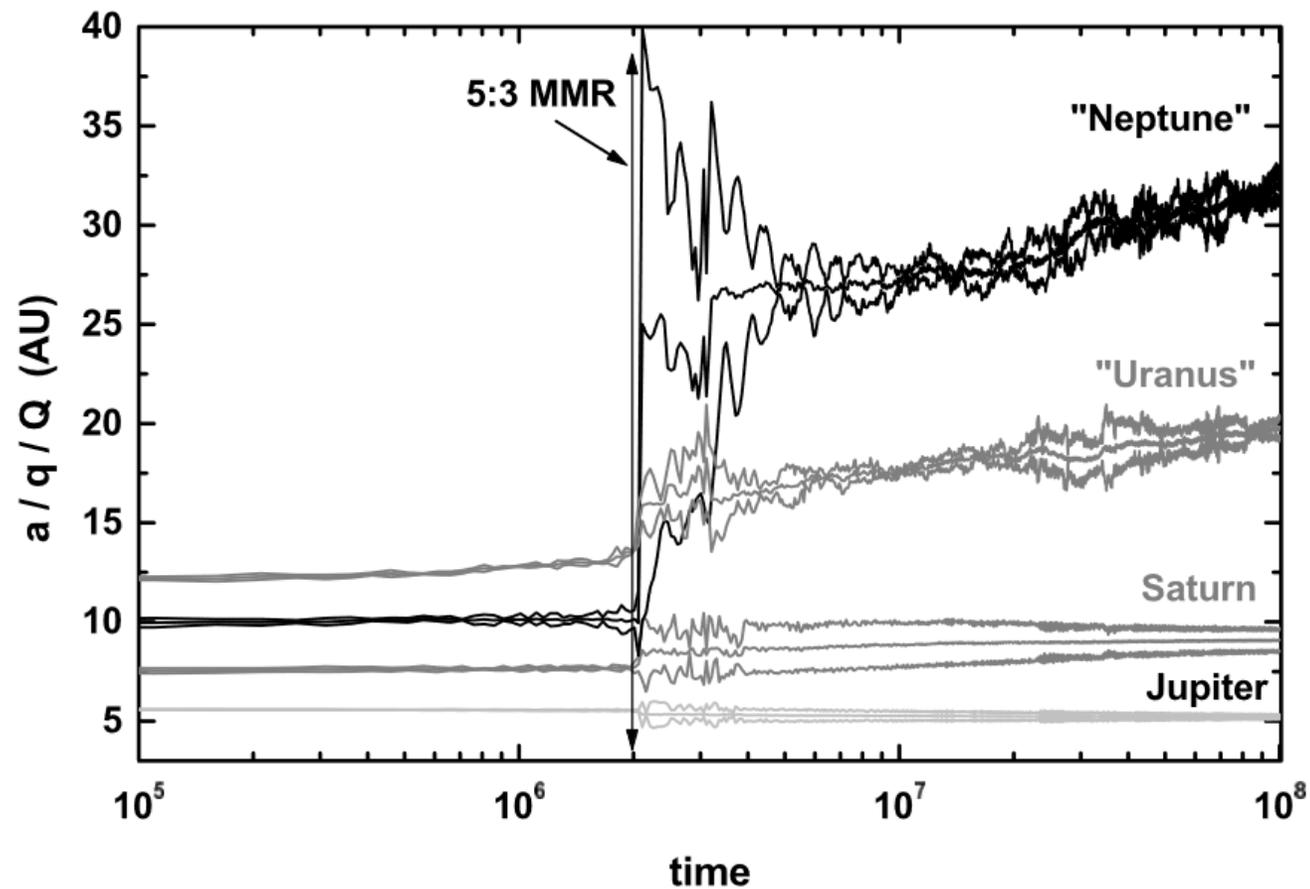
# Stabilité de la chaîne résonnante après disparition du gaz, sans planétésimaux



Morbideli, Tsiganis, Crida, Levison et Gomes, 2007



## Déclanchement de l'instabilité en présence d'un disque de planétésimaux



Morbideli, Tsiganis, Crida, Levison et Gomes, 2007



## A retenir

- Après la disparition du disque de gaz, les planètes géantes migrent en dispersant le disque de planétésimaux. Jupiter migre vers l'intérieur, les autres planètes vers l'extérieur.
- Dès 1993, la migration vers l'extérieur de Neptune a été considérée être la cause de la capture de Pluton en résonance 2/3 avec Neptune. Pareillement pour les Plutinos
- La population de Kuiper chaude peut être implantée dans la ceinture de Kuiper depuis le disque traversé par Neptune. Le disque dispersé et son extension fossilisée sont l'extension de la population chaude au-delà de 50 ua.
- Lors de la migration induite par les planétésimaux, les orbites de planètes restent circulaires et coplanaires
- La première version du modèle de Nice postule que Jupiter et Saturne étaient initialement plus proches de leur résonance 2/1. En traversant cette résonance pendant leur migration divergente, ces deux planètes ont acquis des orbites excentriques, qui ont déstabilisé le système.
- Ce modèle explique les orbites actuelles des planètes géantes et la capture des Troyens de Jupiter. Propose la possibilité d'une instabilité tardive, si besoin.
- Cependant, les planètes après leur migration dans le disque de gaz devaient être dans une chaîne résonnante.
- La migration induite par les planétésimaux peut enclencher une instabilité des planète géantes en partant de ces configurations résonnantes. Mais toute la statistique du modèle doit être refaite -> Modèle de Nice 2.0