



**Leçon N. 7 – 4 Decembre 2024**

**Alessandro  
MORBIDELLI**

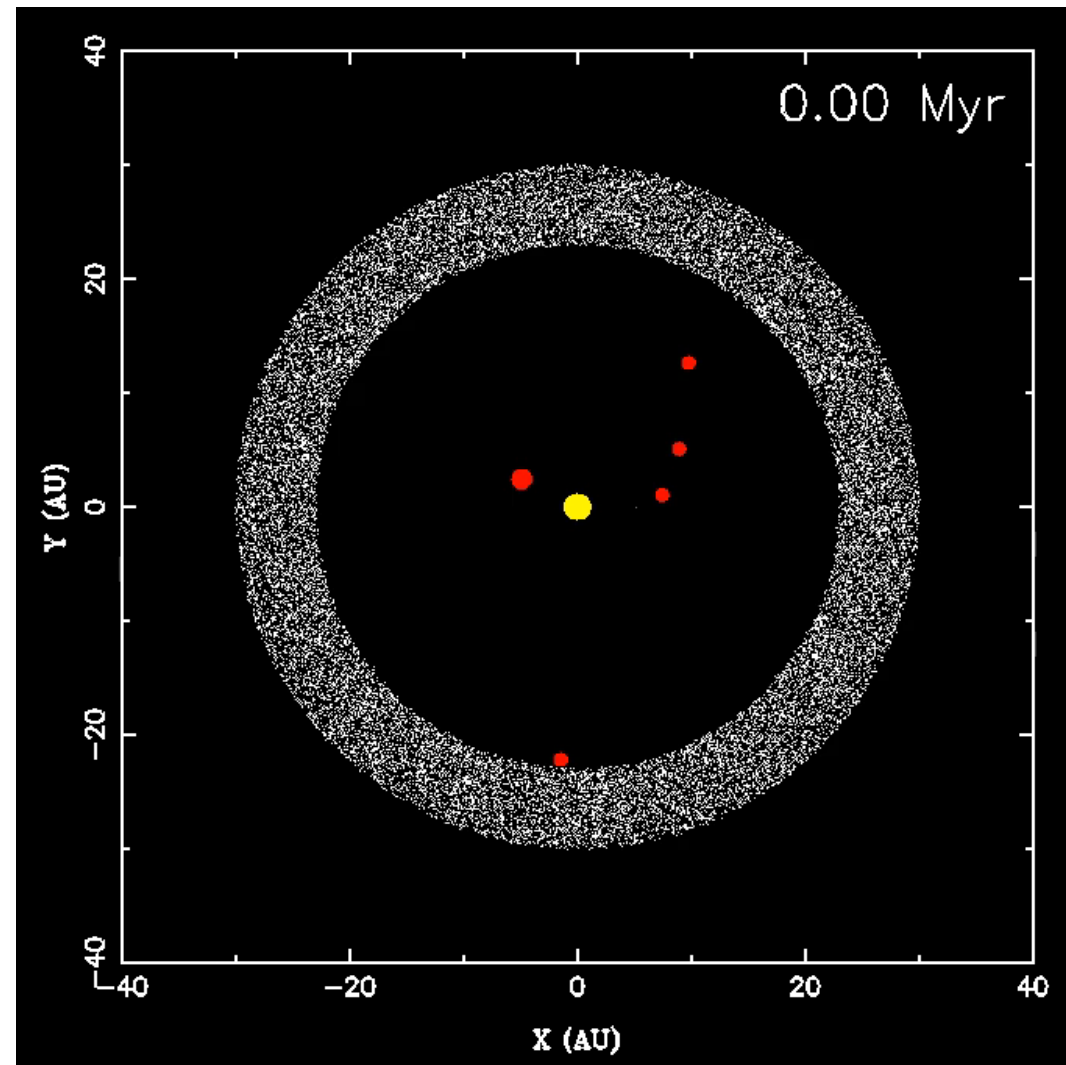
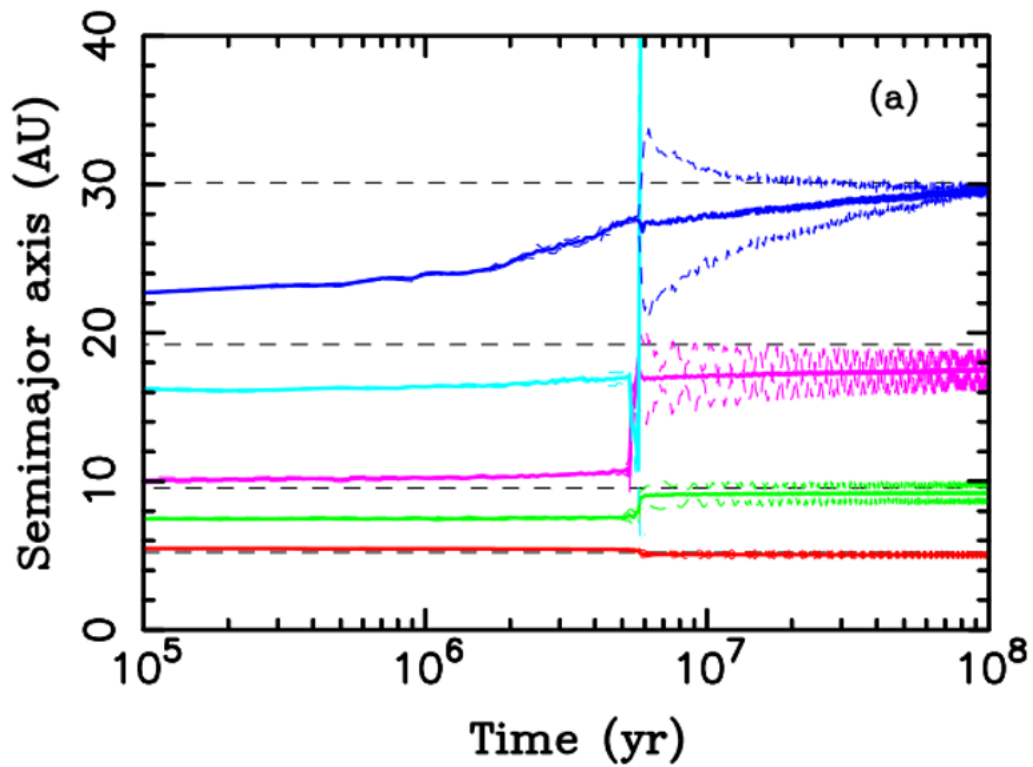
Chaire

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

***Origine et évolution du Système solaire externe:  
L'origine de la ceinture de Kuiper dans le modèle de Nice***



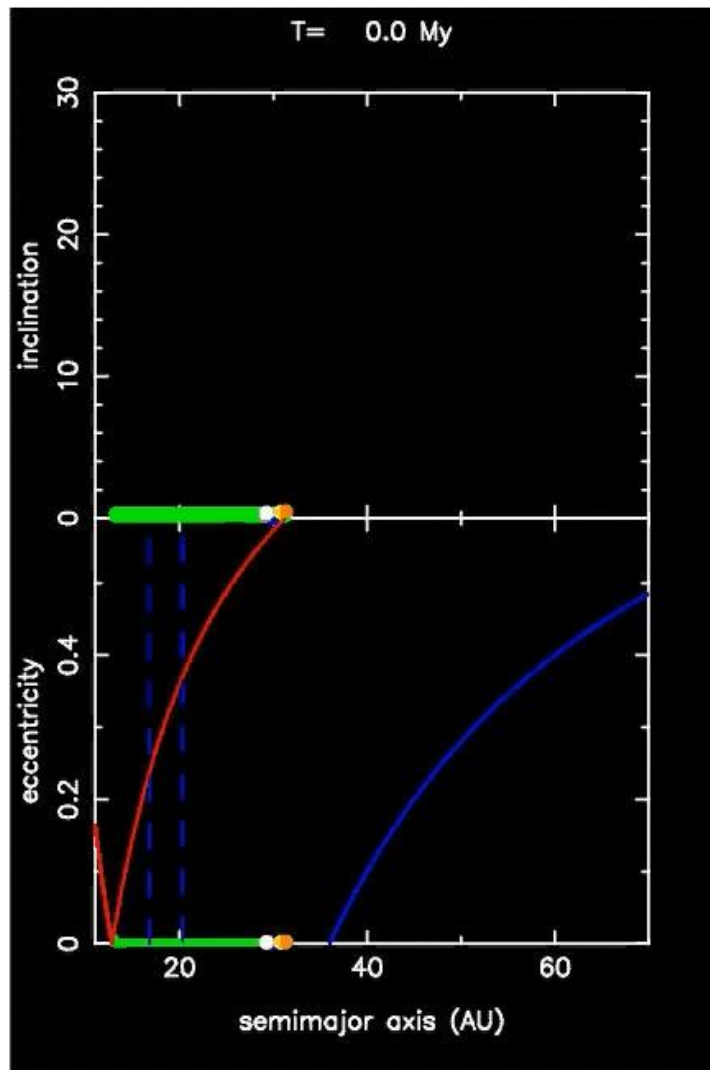
# La dispersion du disque trans-Neptunien



Animation par David Nesvorny



# Formation du disque dispersé





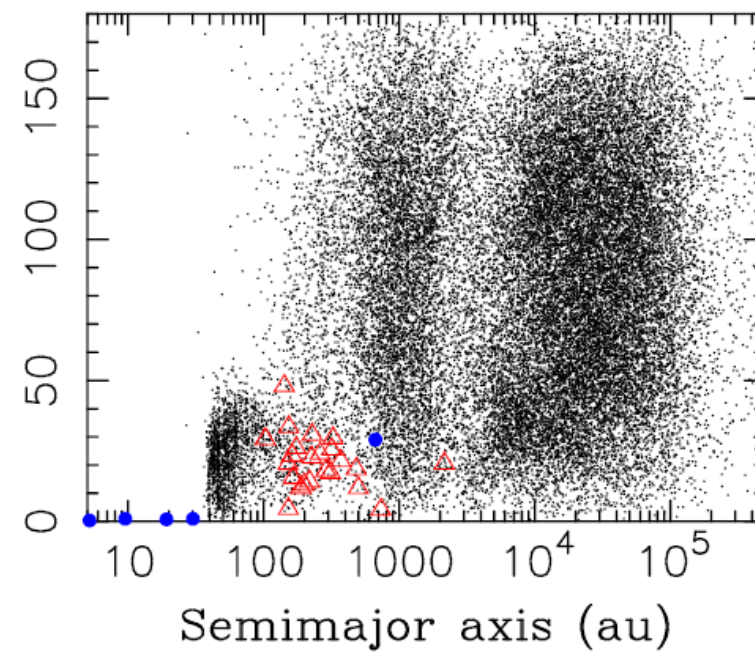
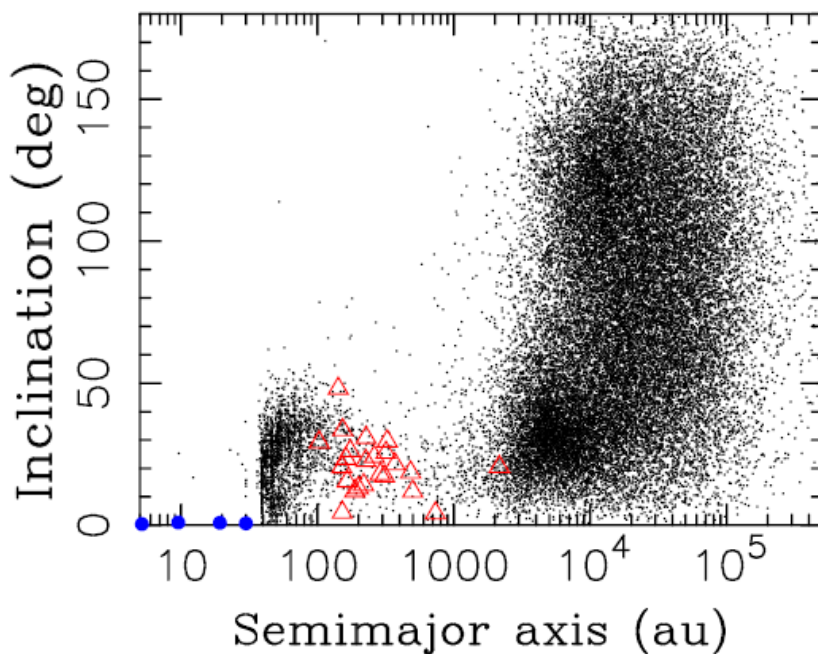
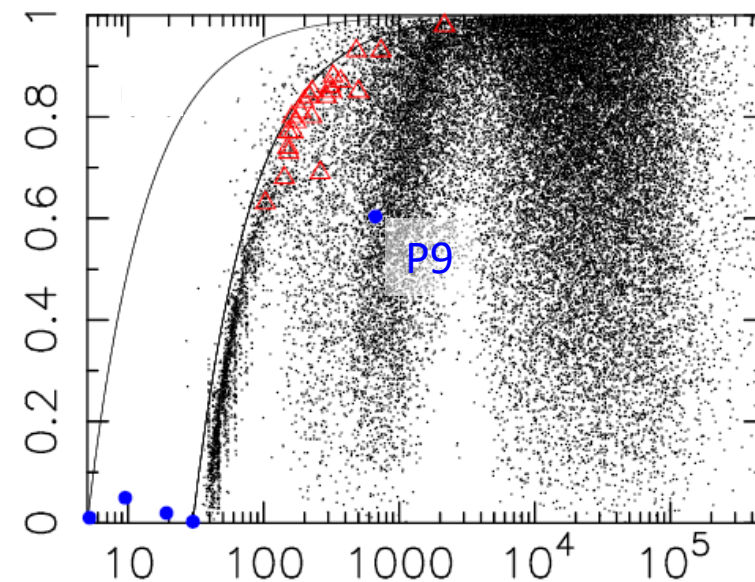
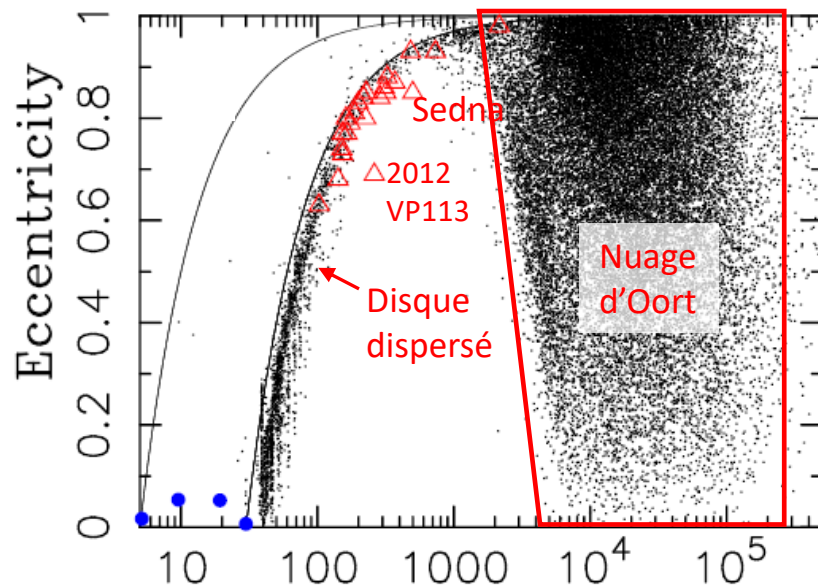
## Formation du disque dispersé (et du nuage d'Oort)

Distribution finale (aujourd'hui) des objets dispersés par l'instabilité des planètes géantes

Simulation faite en supposant un environnement galactique de  $0.1 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$

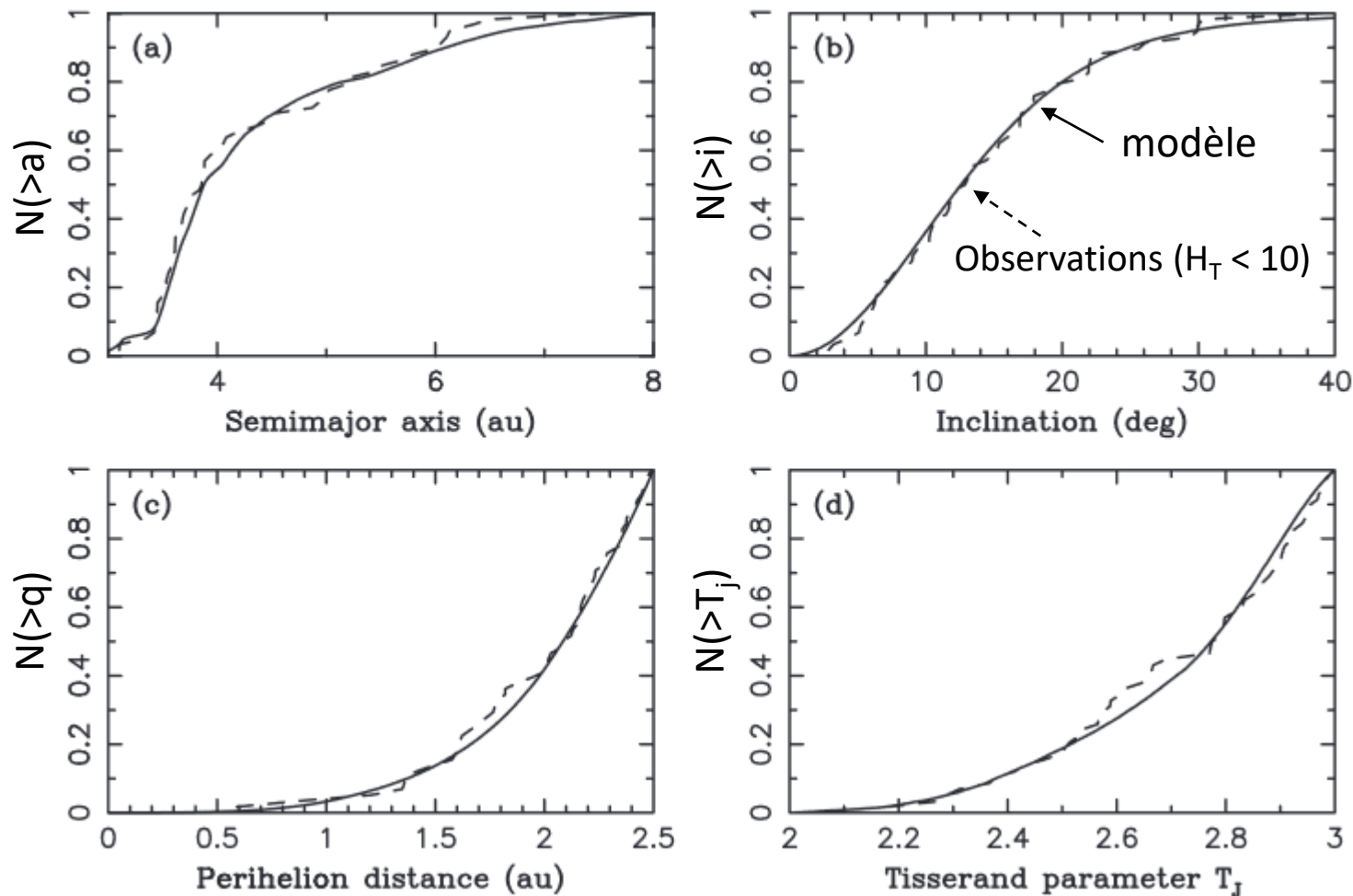
Nesvorny et al., ApJ, 2017.

Ici P9 a 15 masses terrestres





## Distribution des JFCs



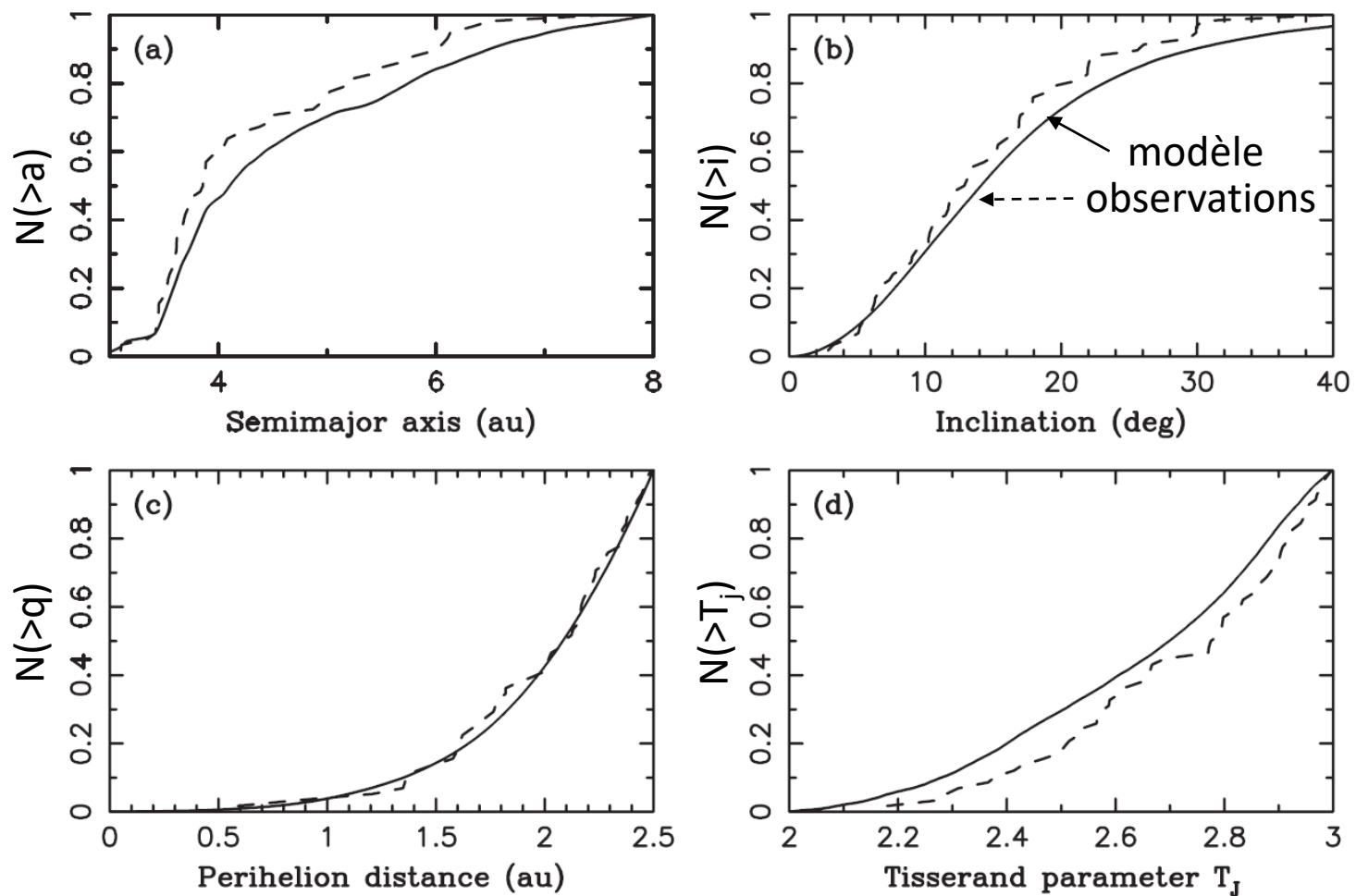
Validation de la distribution obtenue dans le disque dispersé

Attention: l'inclinaison d'une comète tend à augmenter au cours du temps à cause des perturbations par Jupiter.

Ce fit a été obtenu en postulant que les comètes restent actives seulement  $\sim 500$  orbites



# Distribution des JFCs



Le fit se dégrade si P9 est incluse (attention, ici P9 est 2x plus massif qu'actuellement prédit)



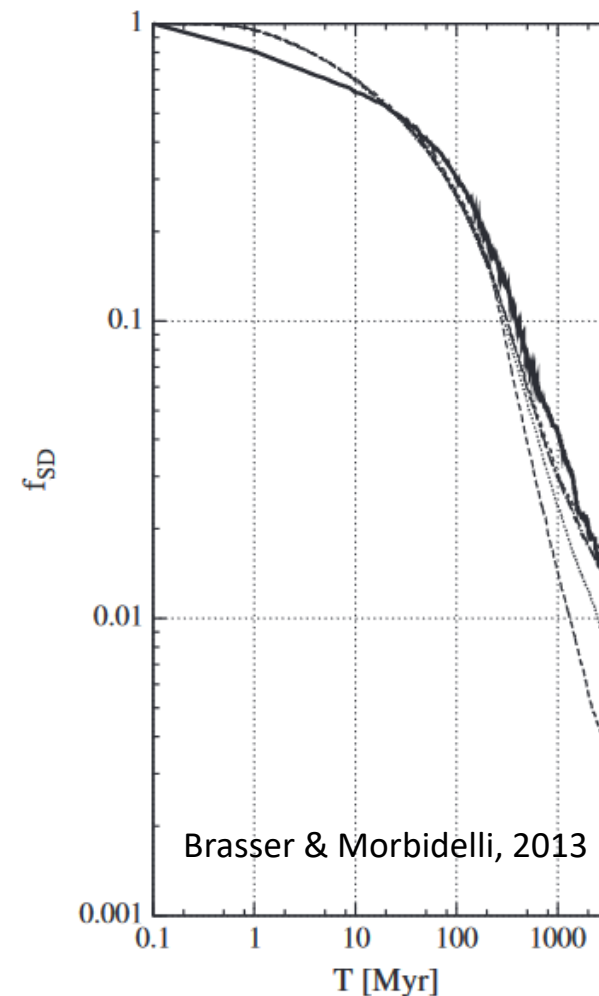
## La population du disque dispersé

Pour maintenir la population observée des comètes de la famille de Jupiter (3-5 objets avec  $D > 10$  km) en état stationnaire, le modèle requière qu'il y ait  **$4 - 6 \times 10^7$  objets de  $D > 10$  km actuellement dans le disque dispersé** (Nesvorny et al., 2017)

La population du disque dispersé décroît sans cesse.  
Elle est aujourd'hui 0.3-1% plus faible qu'à l'origine.

Le disque originel trans-Neptunien devait alors inclure  
 **$\sim 10^{10}$  objets de  $D > 10$  km**

**Le nuage d'Oort contiendrait aujourd'hui 20x plus d'objets que le disque dispersé**

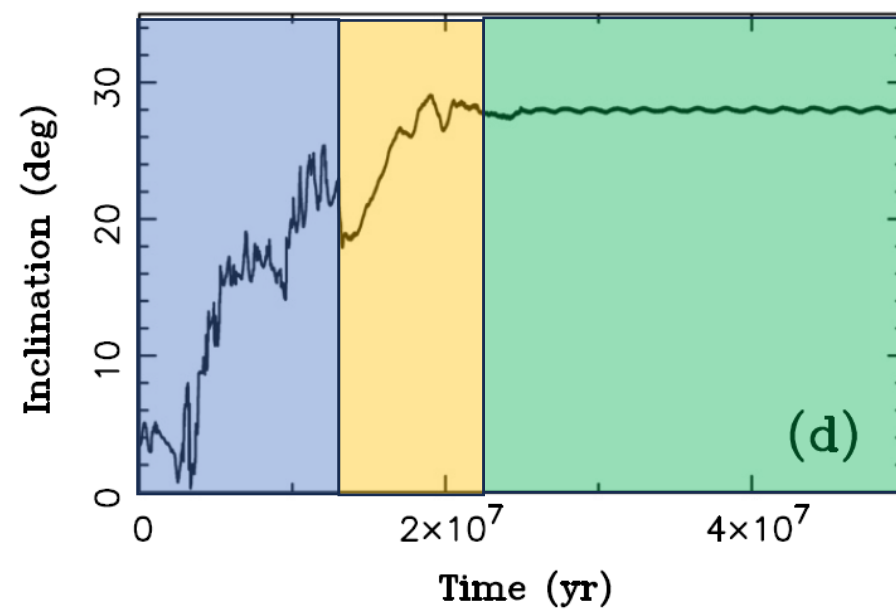
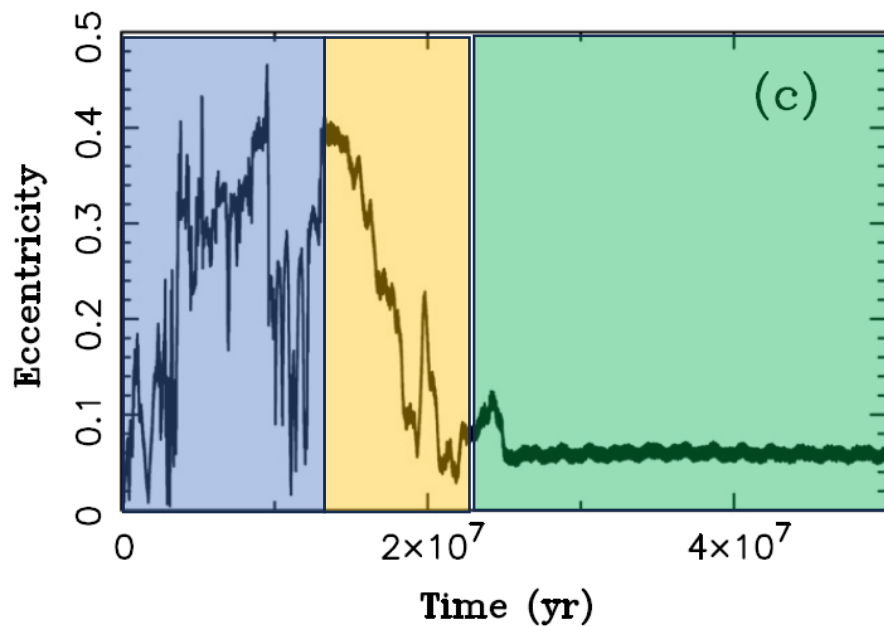
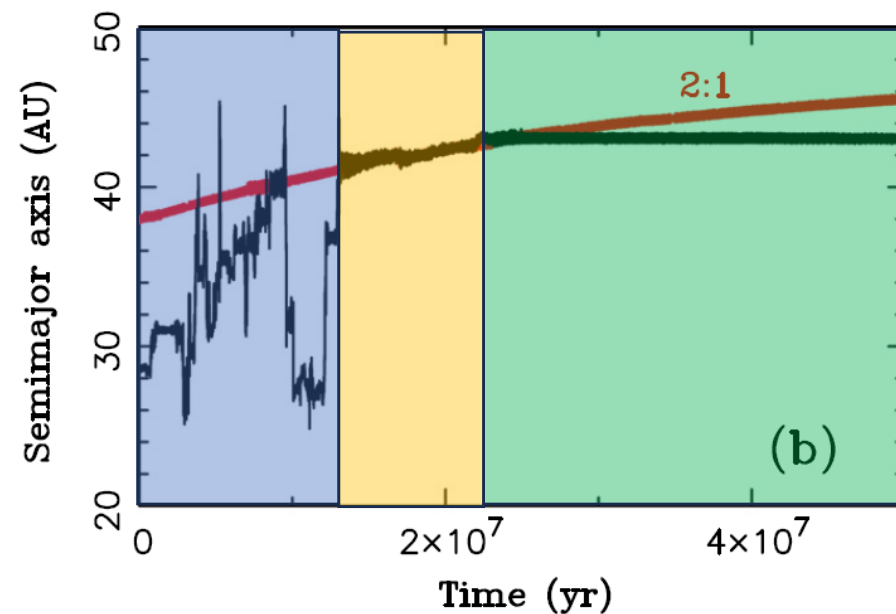
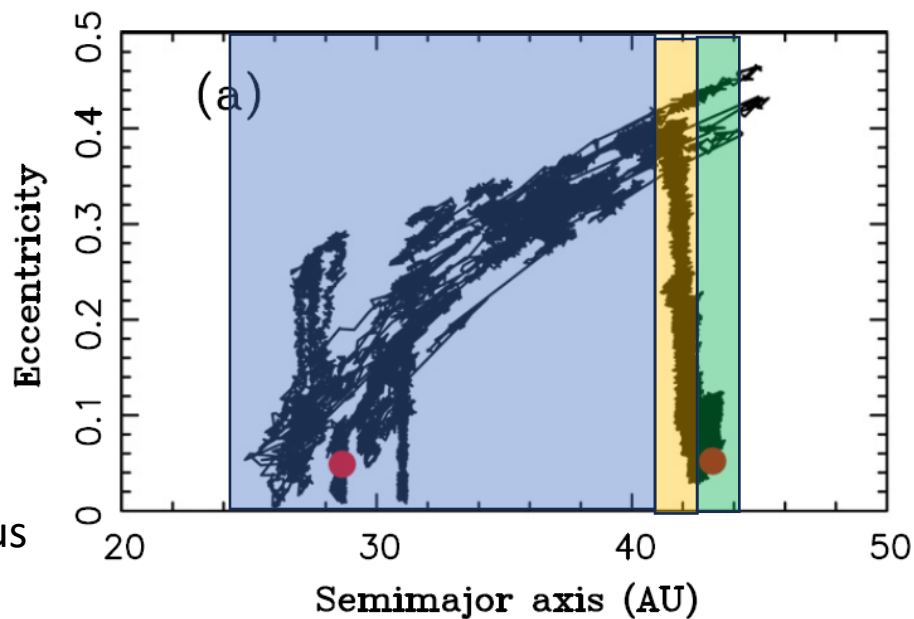




# Origine de la population chaude

Comme dans  
Gomes, 2003, Icarus

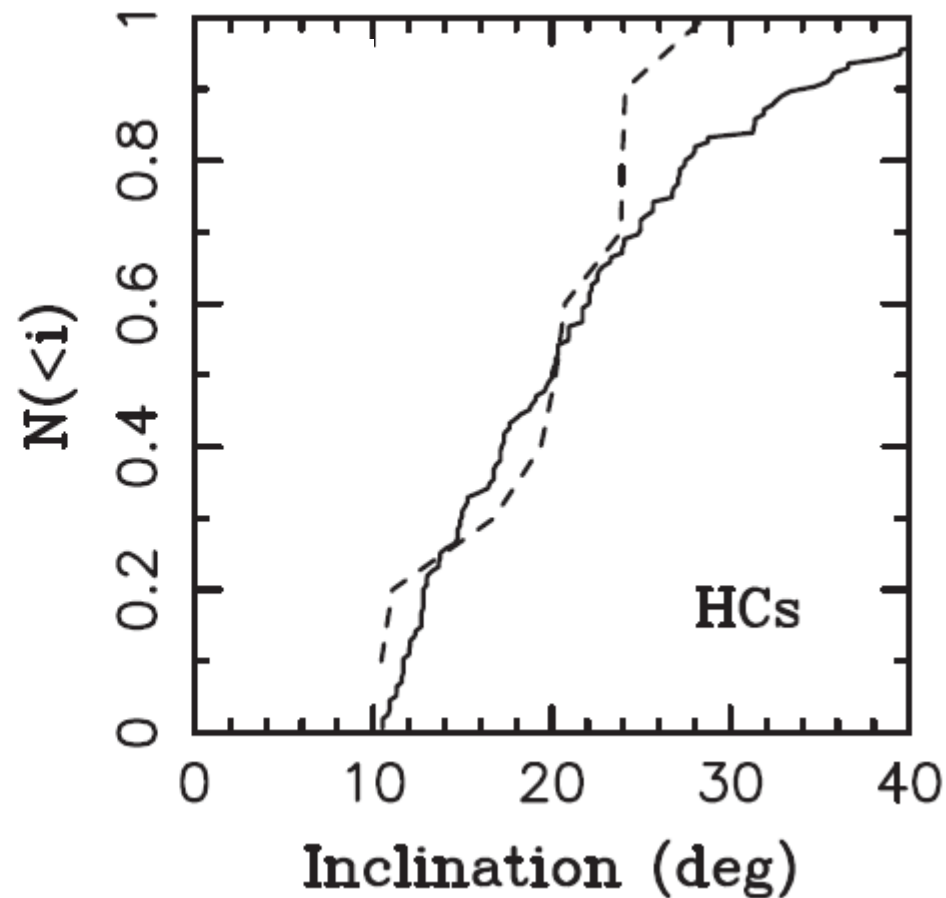
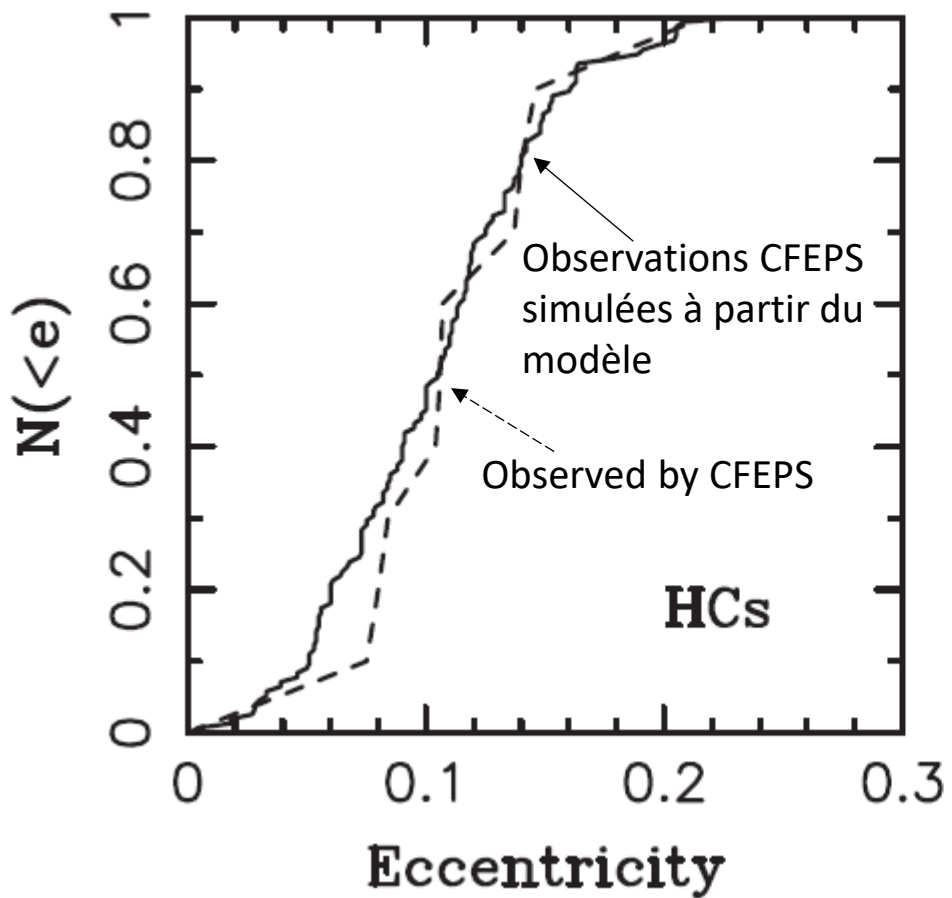
(ici Nesvorny, AJ, 2015)







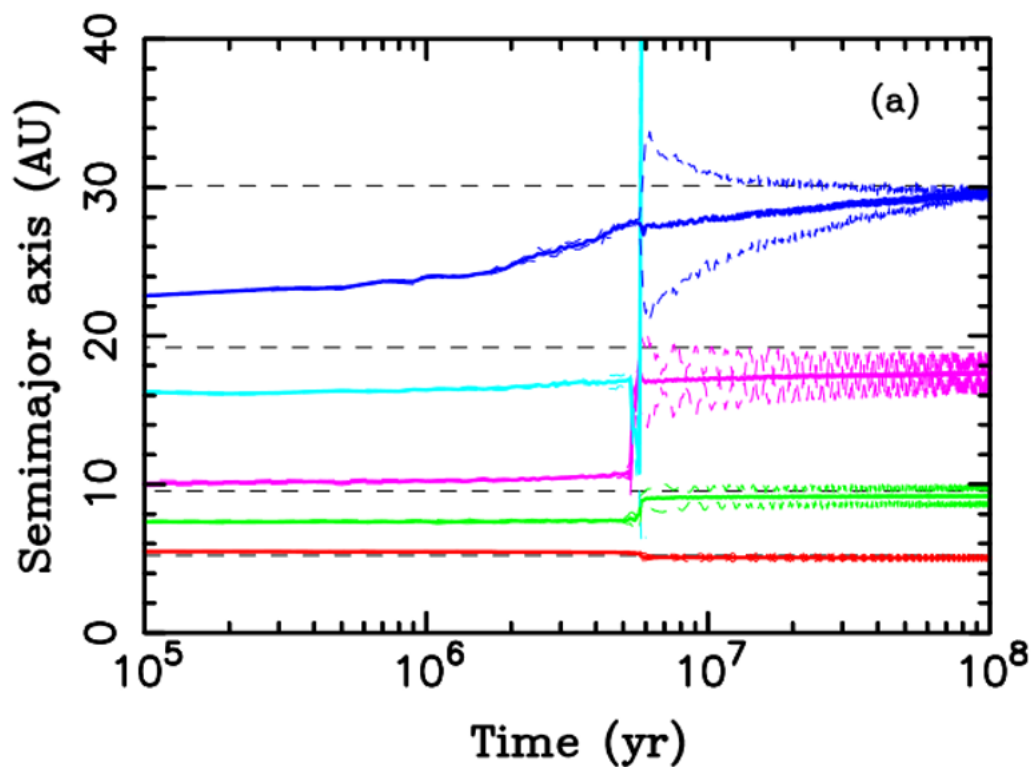
# Origine de la population chaude





## Origine de la population chaude

Ce bon accord est obtenu si la migration de Neptune est lente,  $a = a_f - (a_f - a_i)e^{-t/\tau}$  avec  $\tau > 30$  Ma ce qui est cohérent avec les simulations du modèle de Nice



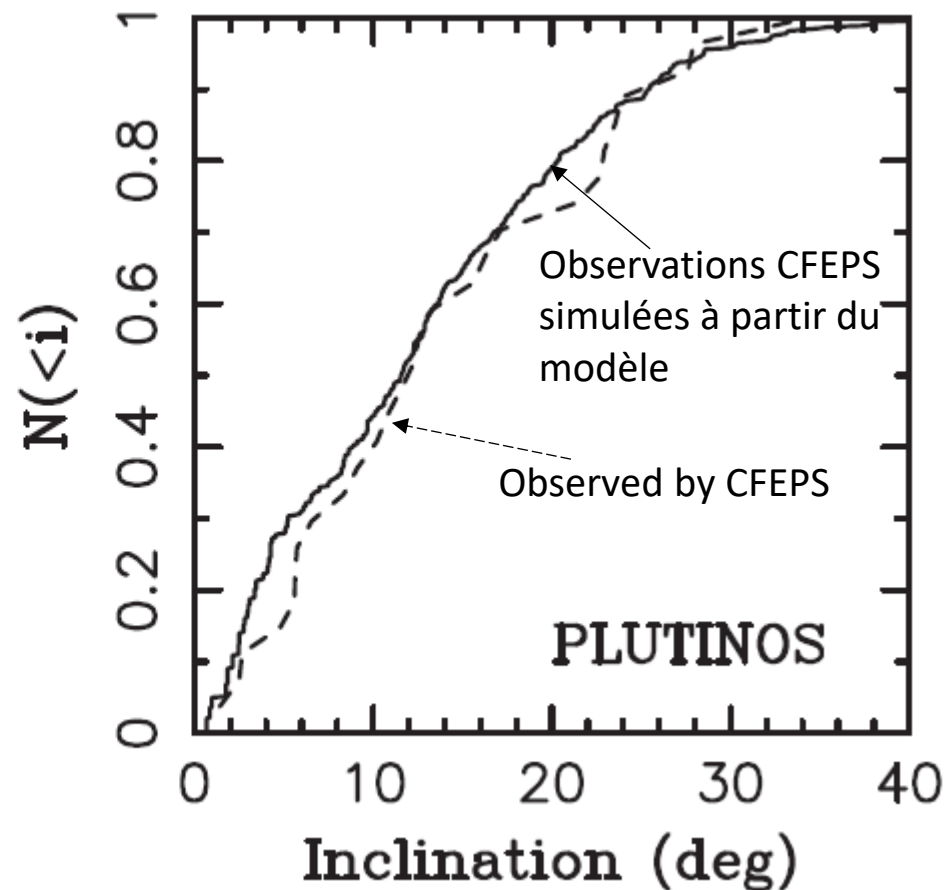
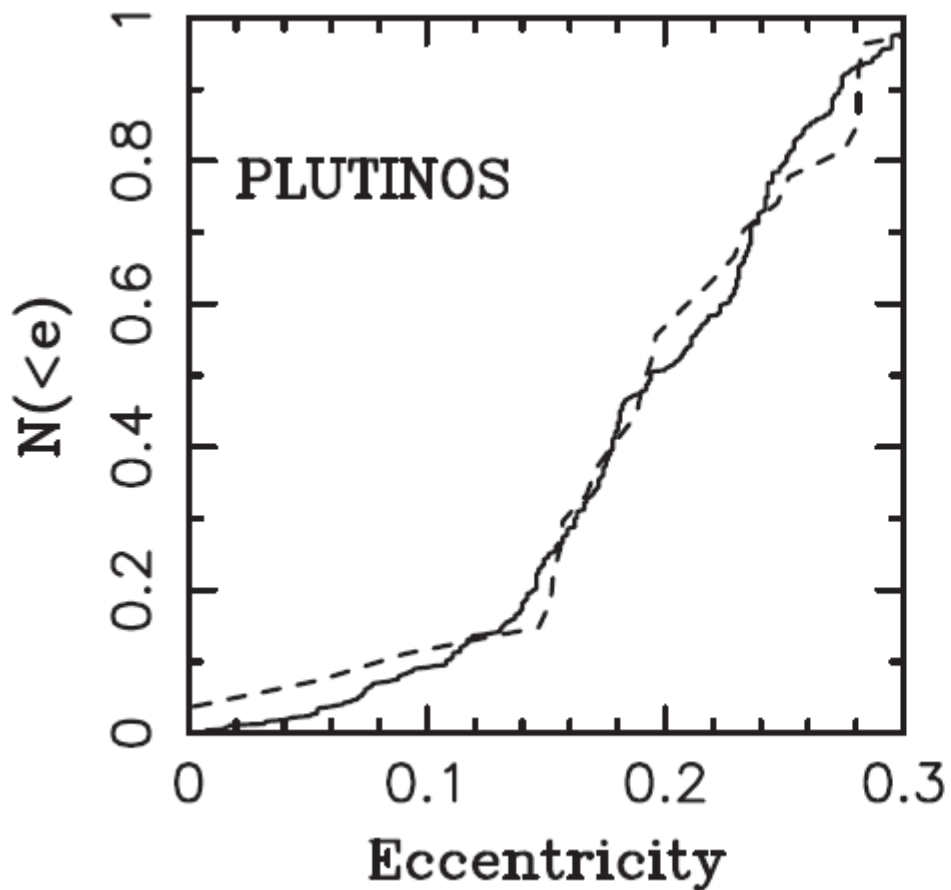
La probabilité de capture dans la population chaude est de  $2-4 \times 10^{-4}$ . Elle est donc 10-30x moins que la population dispersée

Les observations Adams et al. (2014) suggèrent l'existence de  $19,000 \pm 5,000$  corps avec  $H < 9$  ( $D > 100$  km) dans la population chaude.

Ceci implique l'existence de  $6 \pm 3 \times 10^7$  objets de  $D > 100$  km dans le disque trans-Neptunien originel



## Origine des Plutinos





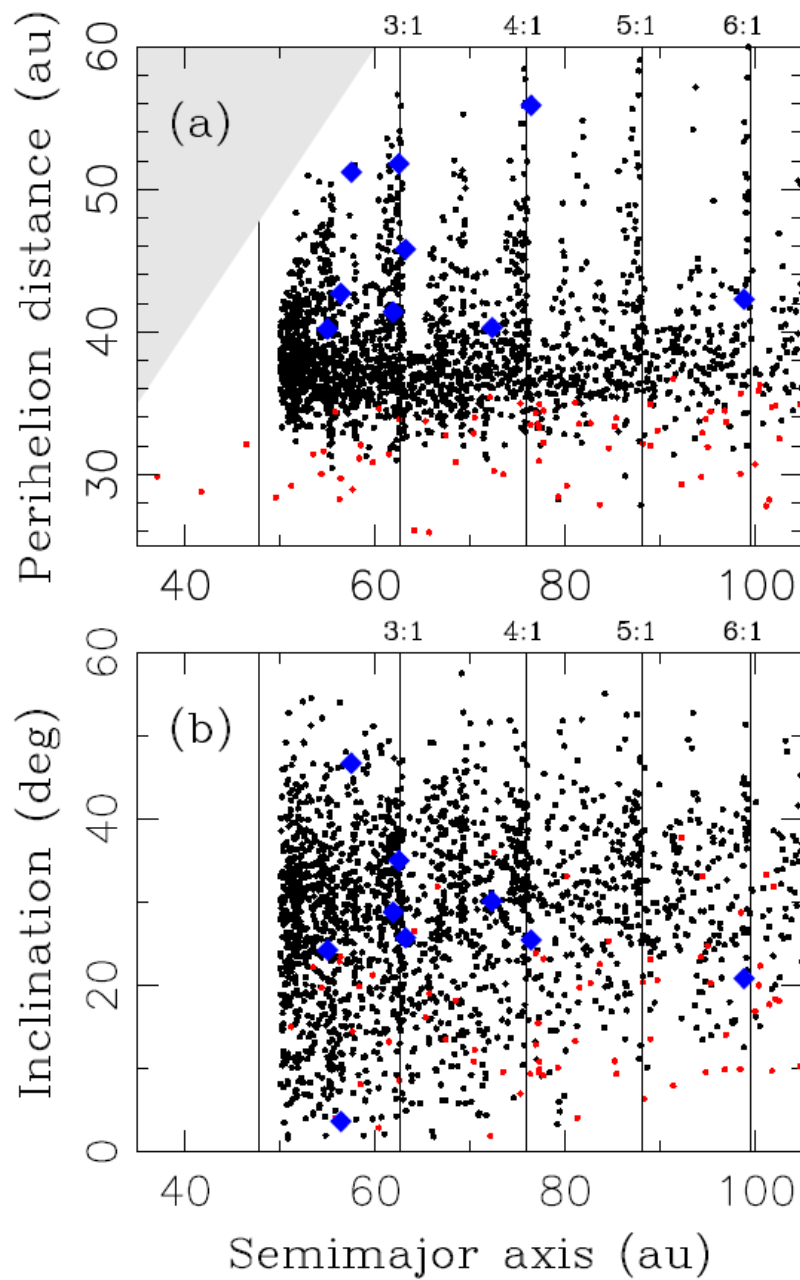
## Origine du disque fossilisé

Comme dans Gomes, 2003, *Earth, Moon and Planets*

Ici Nesvorny et al., 2016

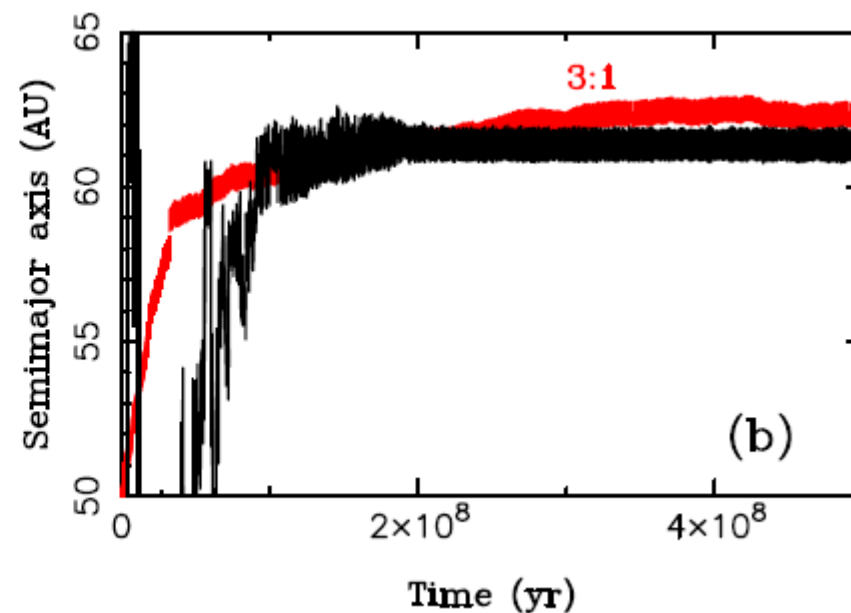
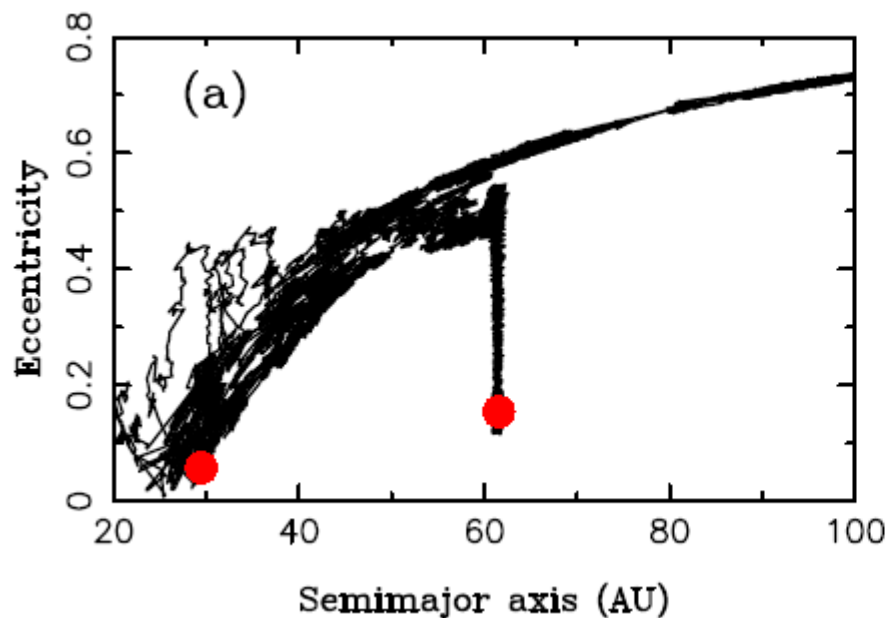
Les objets fossilisés avec les plus grands périhélie sont localisés à proximité de résonances

La population totale est 5x plus grande de celle du disque dispersé dans le même intervalle de demi grand axe (50-100 ua):  $4 \times 10^4$  objets de  $D > 100$  km





## Origine du disque fossilisé



Note: Les objets plus distants ( $a > 100$  ua), avec  $q > 45$  ua (comme Sedna ou 2012 VP 113), nécessitent l'action d'un amas stellaire lors de leur éjection, ou de la planète IX.



## Intermezzo

Jusqu'ici, le modèle de Nice permet de reproduire les données, mais n'offre pas d'avantages particuliers par rapport aux travaux de Gomes (2003a,b).

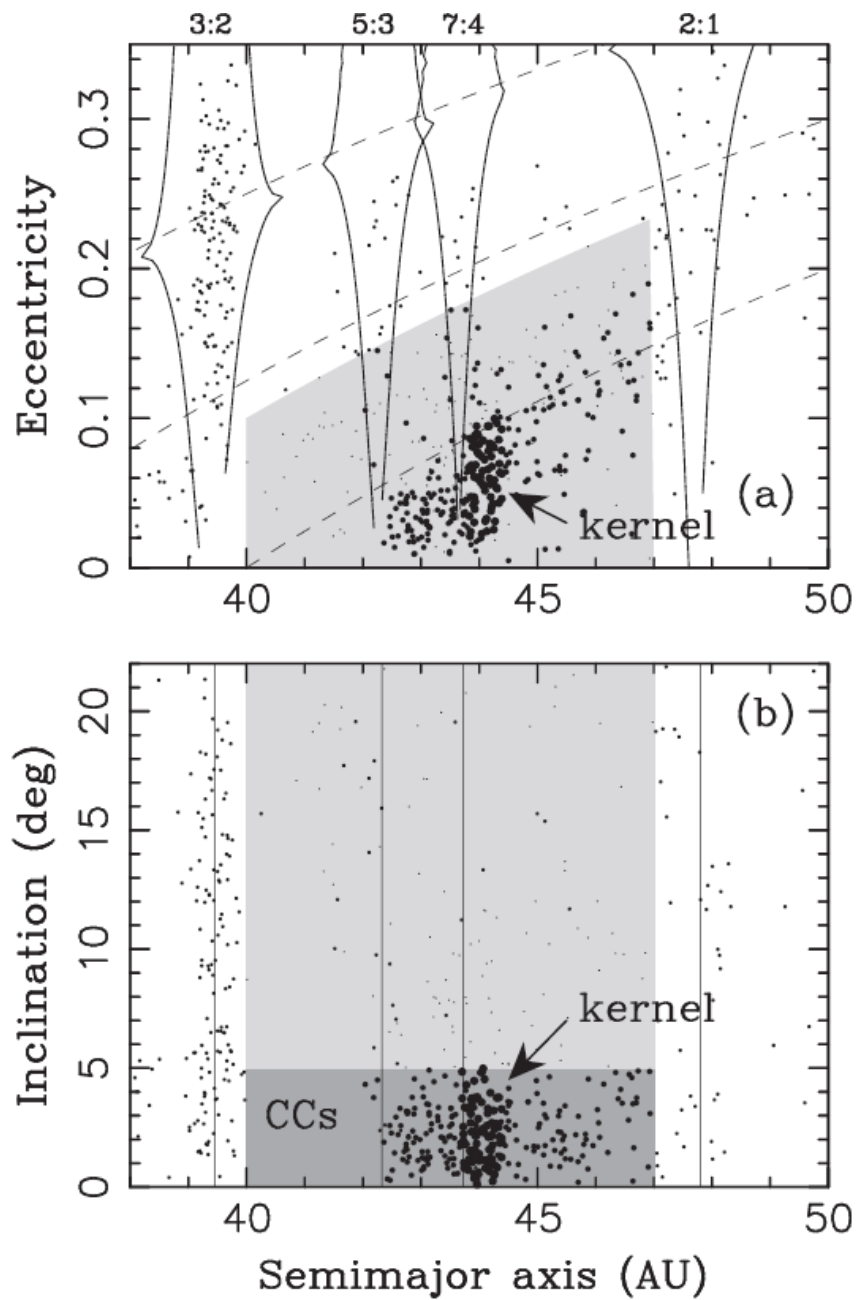
En effet, c'est surtout la migration de Neptune, pas l'instabilité dynamique des planètes géantes qui joue le rôle prépondérant.

**A-t-on besoin d'une instabilité dynamique?**

La population froide donne un premier indice



## Origine de la population froide



caractéristiques principales à expliquer:

- La faible dispersion des inclinaisons ( $i < 4,5^\circ$ )
- L'existence du Kernel



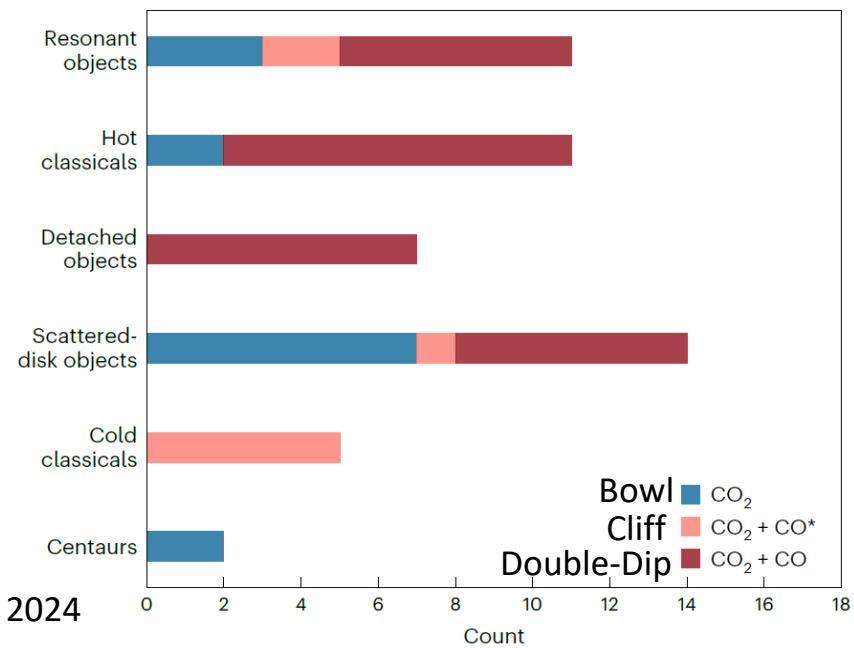
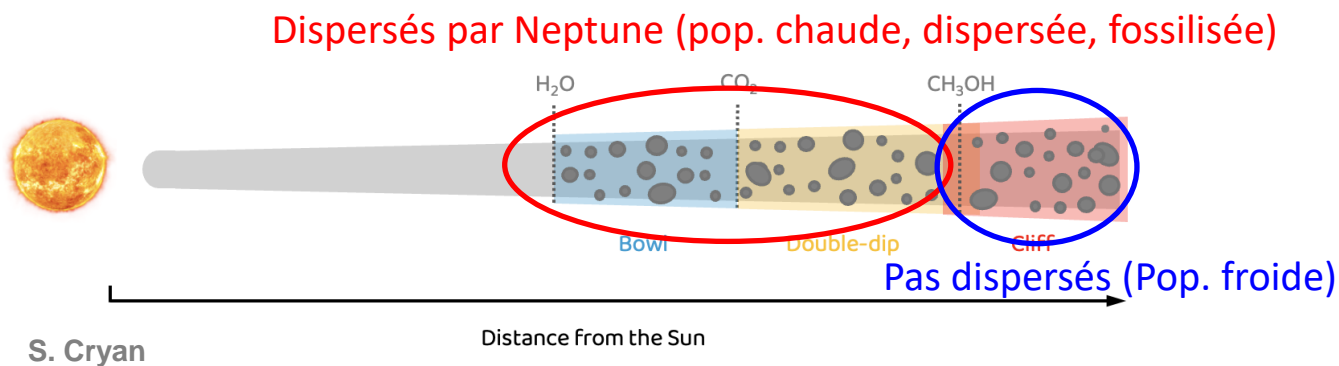
# Considérations sur la faible inclinaison de la population froide

La faible dispersion des inclinaisons implique que ces objets n'ont jamais eu des rencontres proches avec Neptune

Ceci implique:

- L'excentricité de Neptune n'a jamais dépassé  $\sim 0.2$
- Les objets se sont formés localement (plus près du Soleil ils auraient eu des rencontres proches avec la planète)

La formation locale de la population froide est en accord avec les propriétés radicalement différentes entre les populations froide et chaude (couleurs, fraction des binaires etc.)

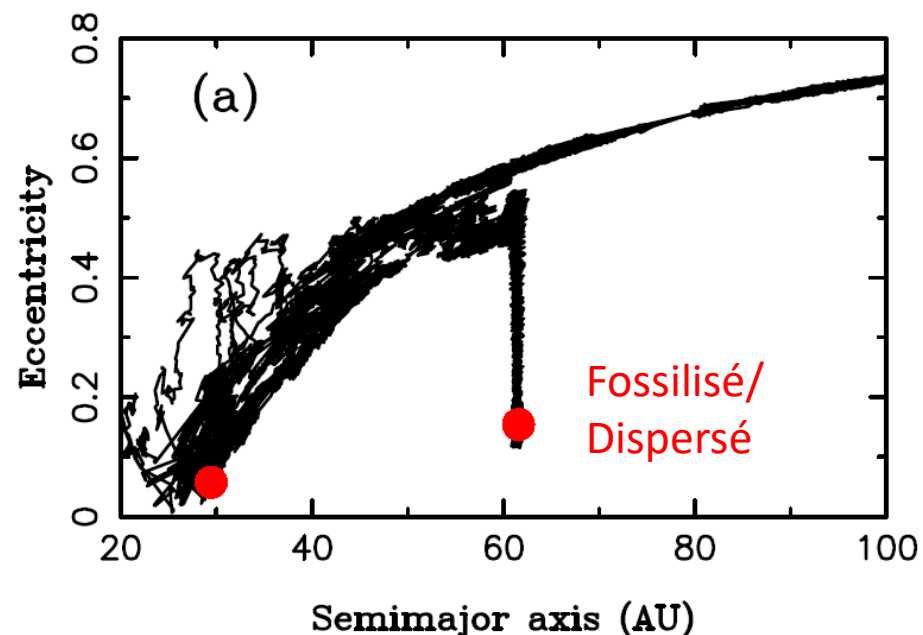
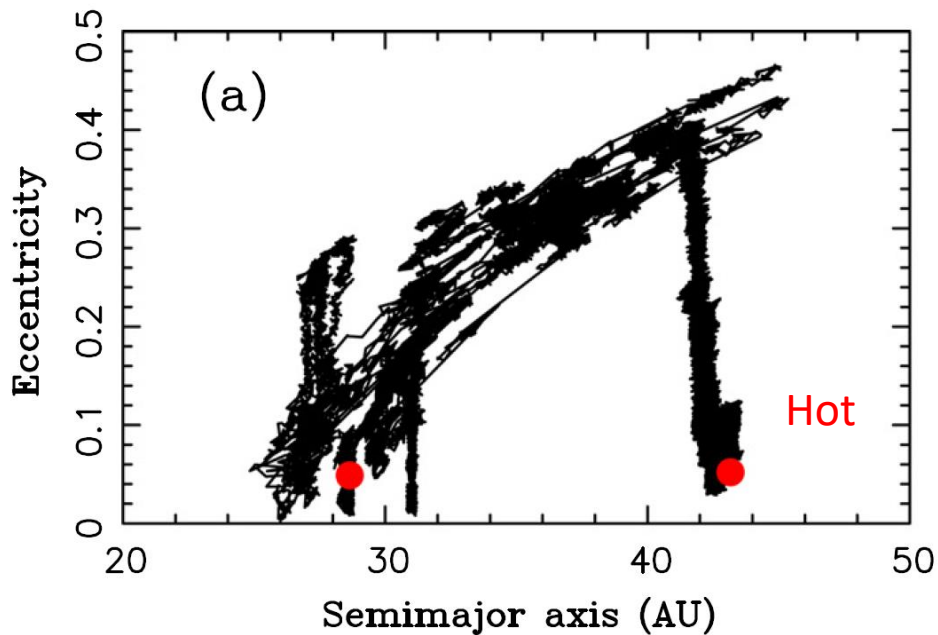


De Prá et al., Nat. Astron., 2024

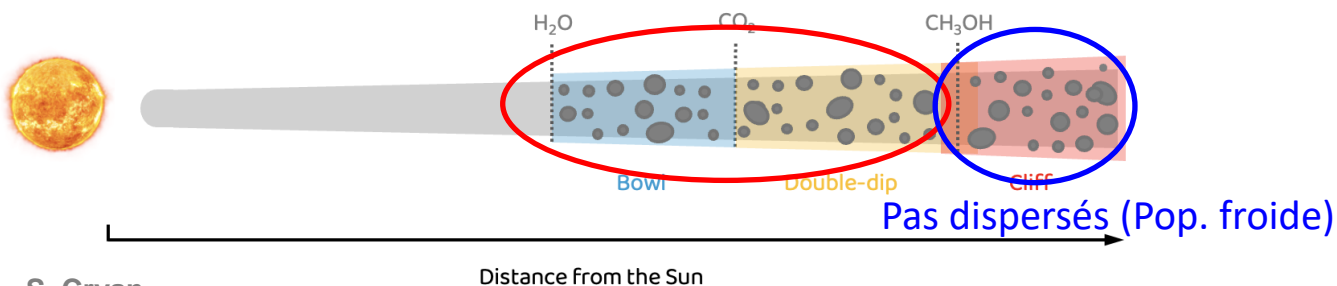




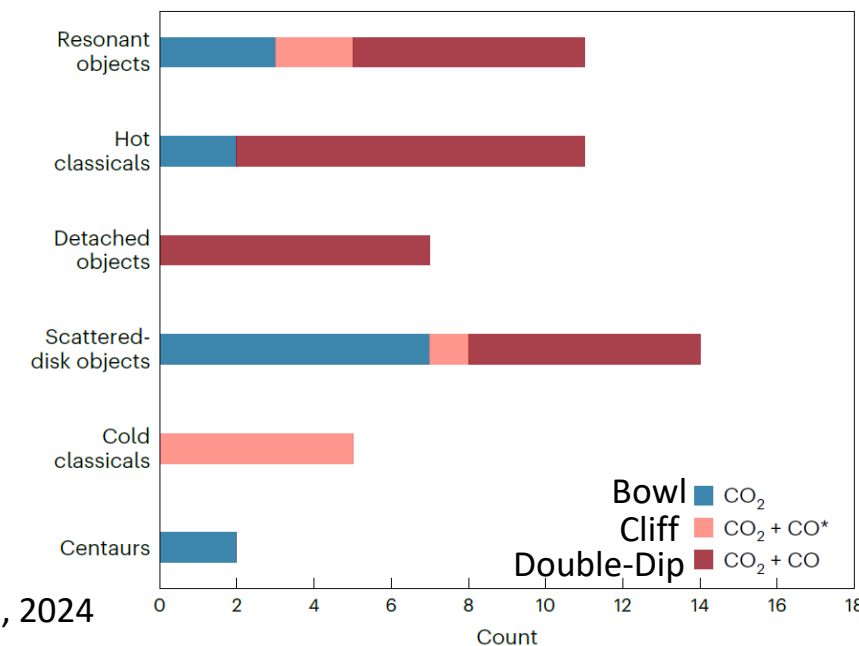
# Considérations sur la faible inclinaison de la population froide



Dispersés par Neptune (pop. chaude, dispersée, fossilisée)



S. Cryan



De Prá et al., Nat. Astron., 2024



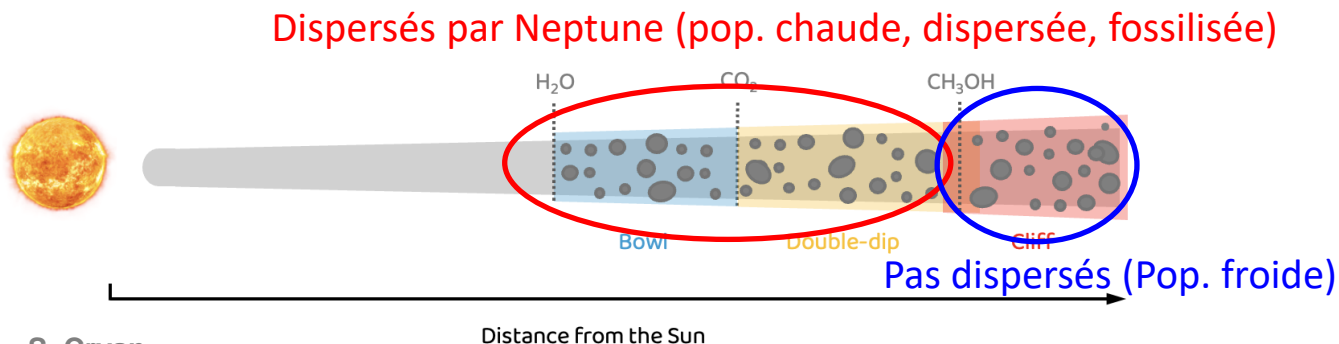
## Considérations sur la faible inclinaison de la population froide

La faible dispersion des inclinaisons implique que ces objets n'ont jamais eu des rencontres proches avec Neptune

Ceci implique:

- L'excentricité de Neptune n'a jamais dépassé  $\sim 0.2$
- Les objets se sont formés localement (plus près du Soleil ils auraient eu des rencontres proches avec la planète)

La formation locale de la population froide est en accord avec les propriétés radicalement différentes entre les populations froide et chaude (couleurs, fraction des binaires etc.)



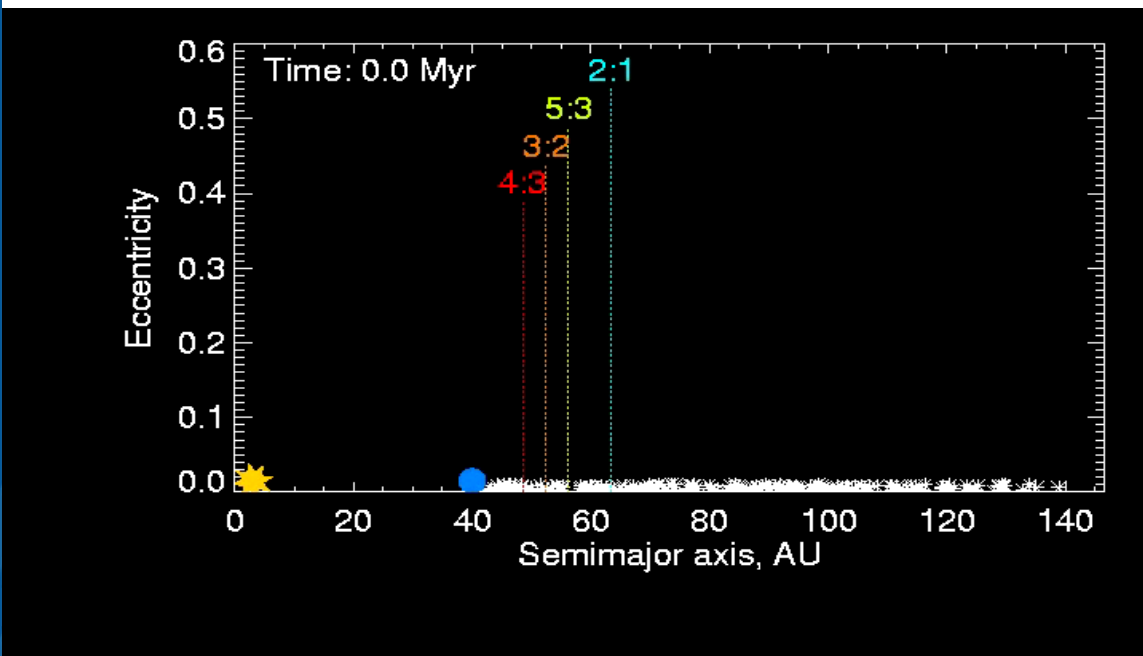
S. Cryan

Puisque elle n'a jamais été dispersée, la population froide garde grosso modo sa masse initiale ( $10^{-3} M_E$ )

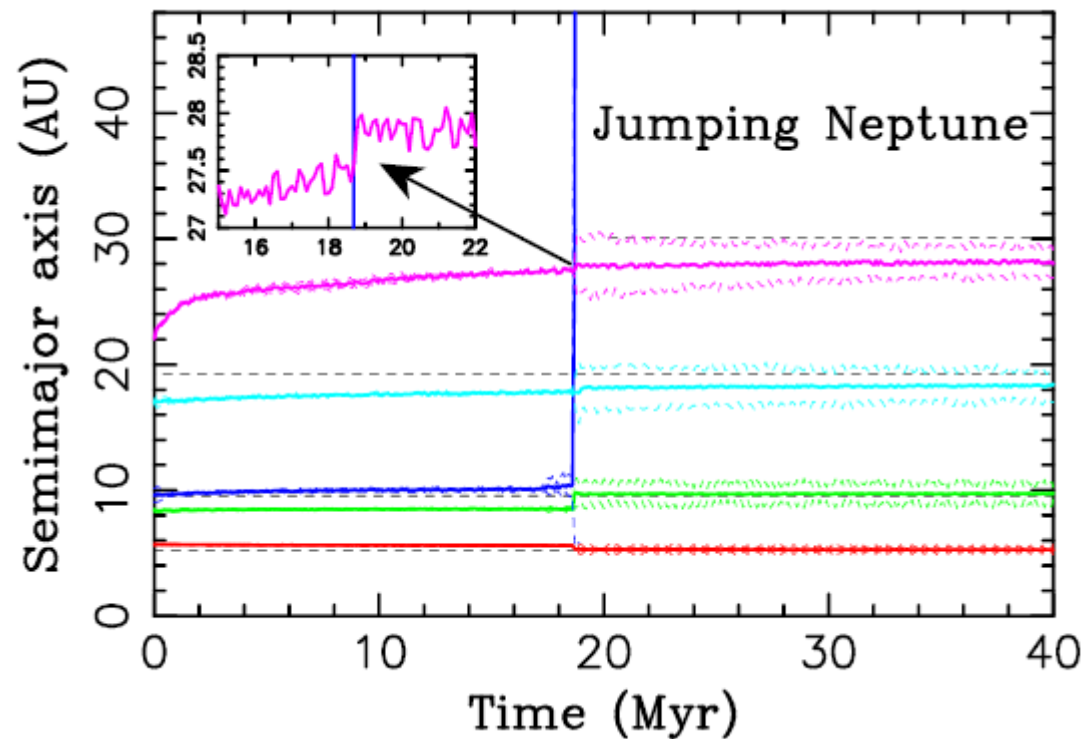
**Nous observons dans la population froide la périphérie du disque original de planétésimaux!**



# Origine du Kernel de la population froide



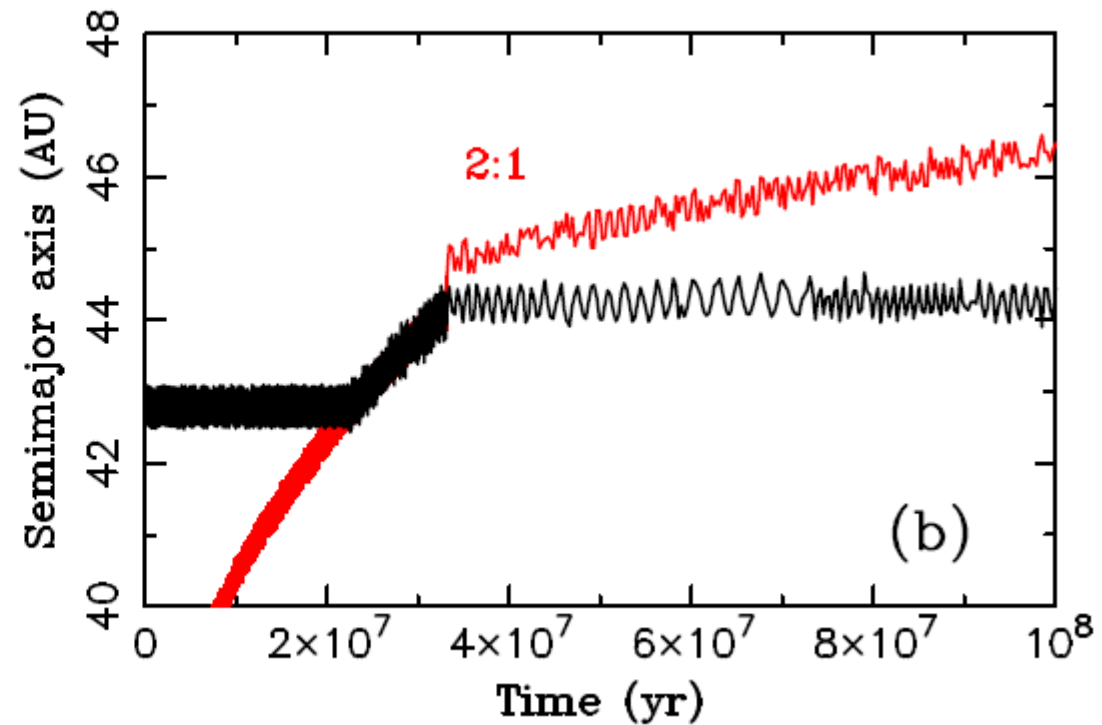
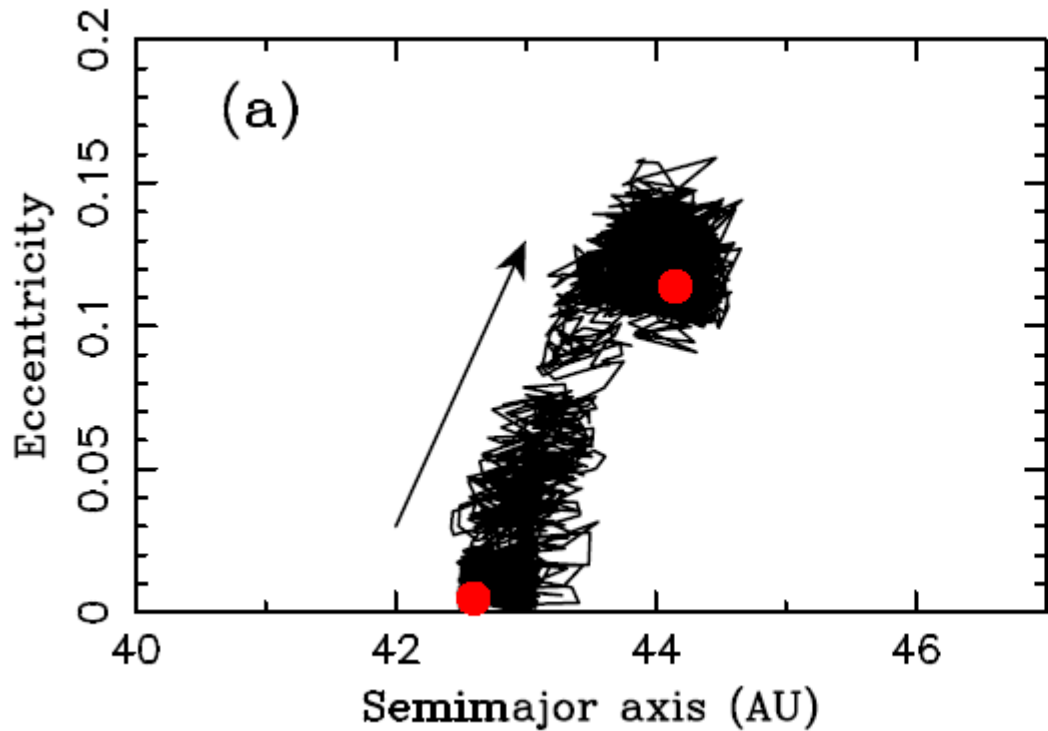
Le déplacement des résonances capture et transporte les objets, tout en augmentant leur excentricité



Si le demi-grand axe de Neptune a un saut, caractéristique d'une instabilité dynamique, les objets résonnants sont relâchés sur place



# Origine du Kernel de la population froide

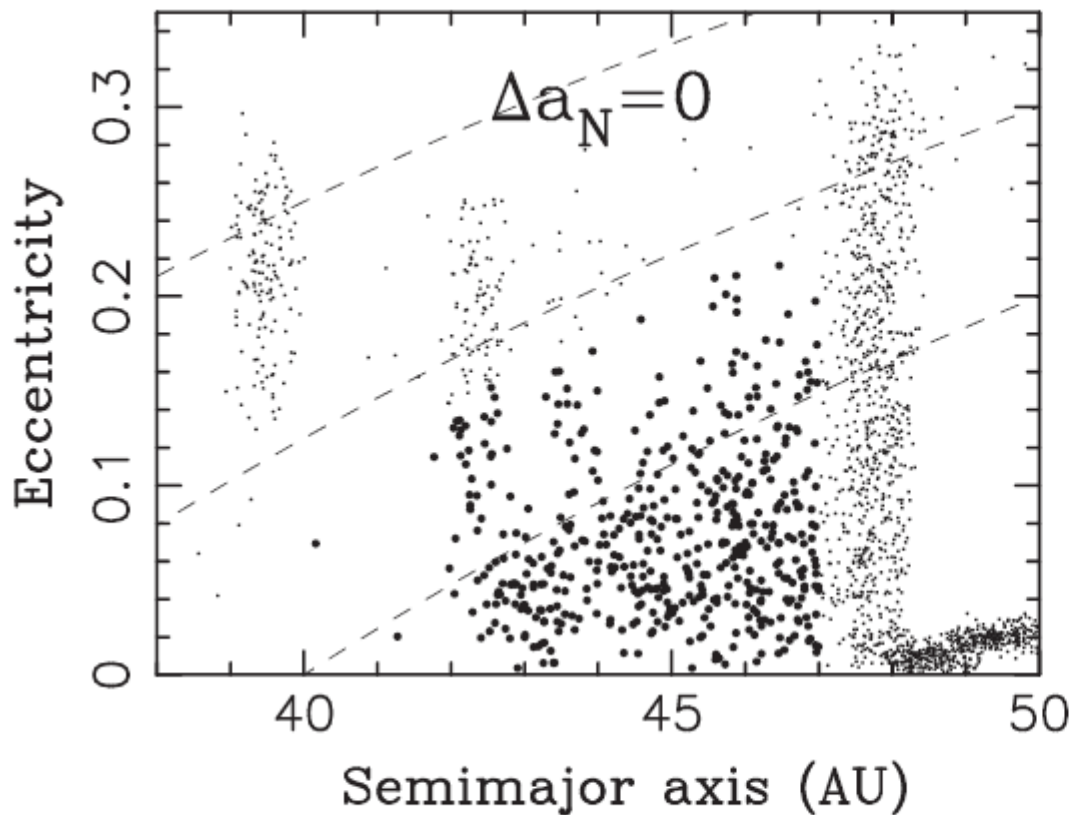


Nesvorný, AJ, 2015

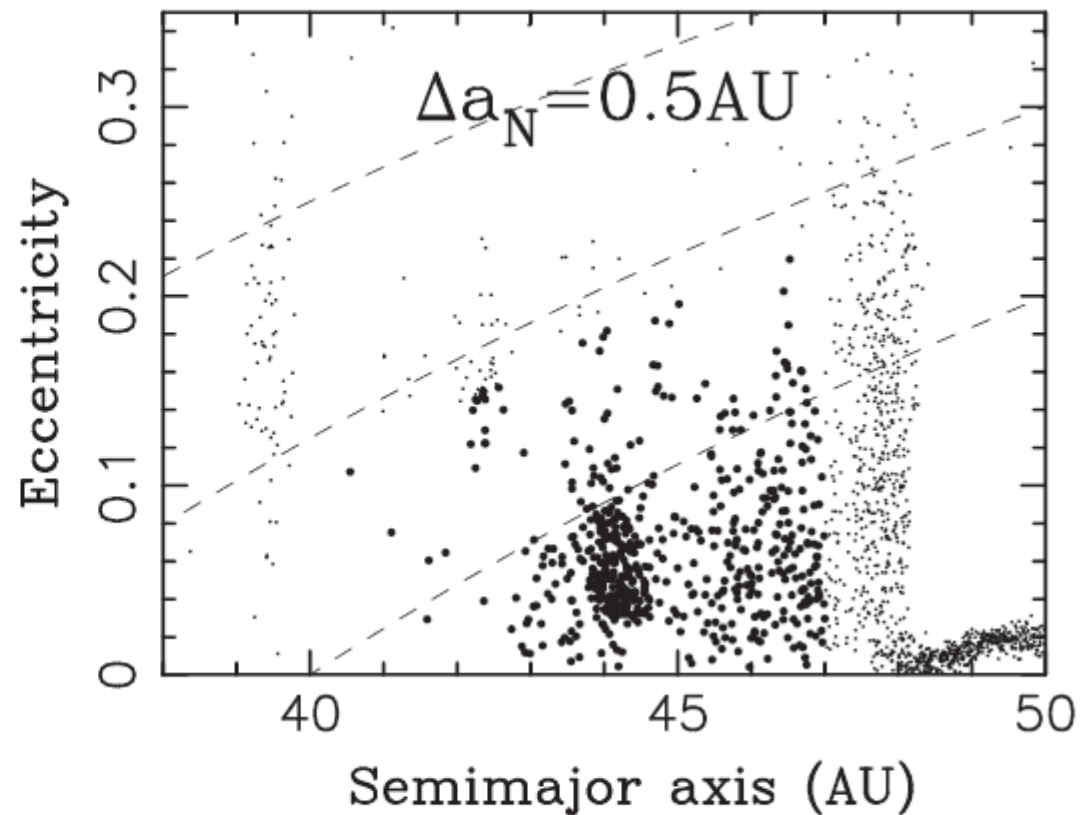


# Origine du Kernel de la population froide

Sans saut en  $a_N$



Avec saut en  $a_N$  à 27,5 ua

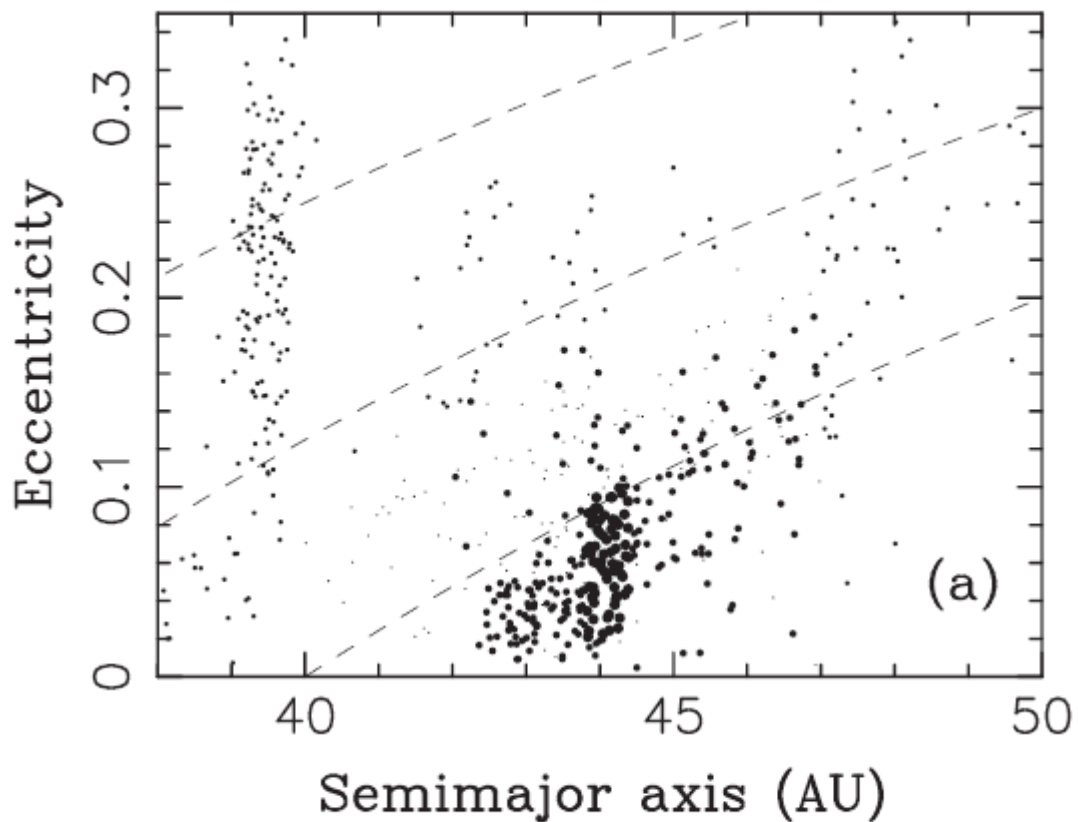


Nesvorny, AJ, 2015

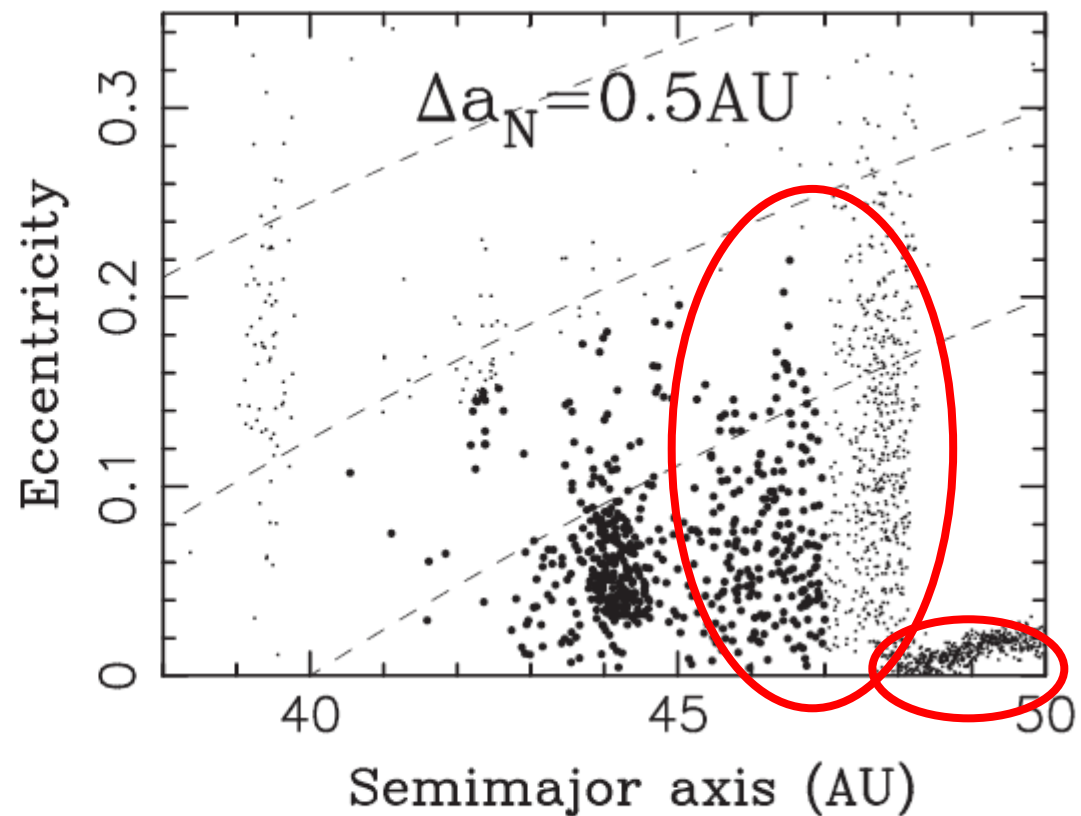


# Origine du Kernel de la population froide

Observé



Avec saut en  $a_N$  à 27,5 ua

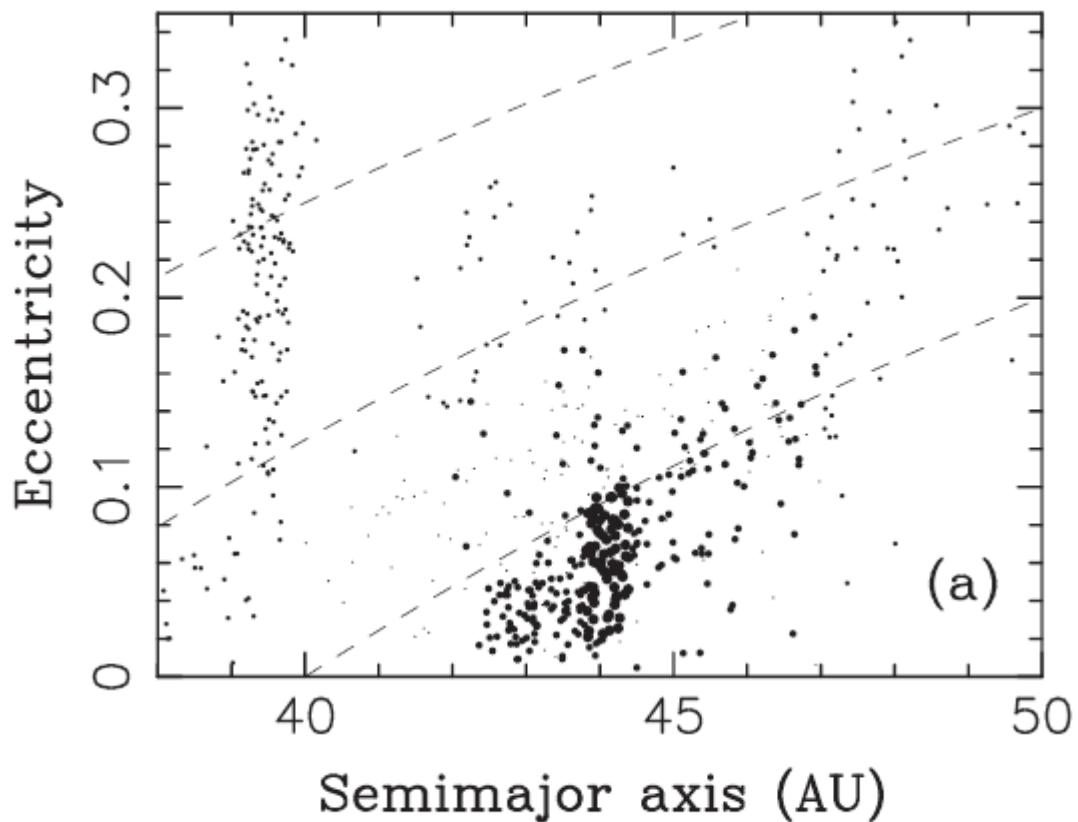


Nesvorny, AJ, 2015

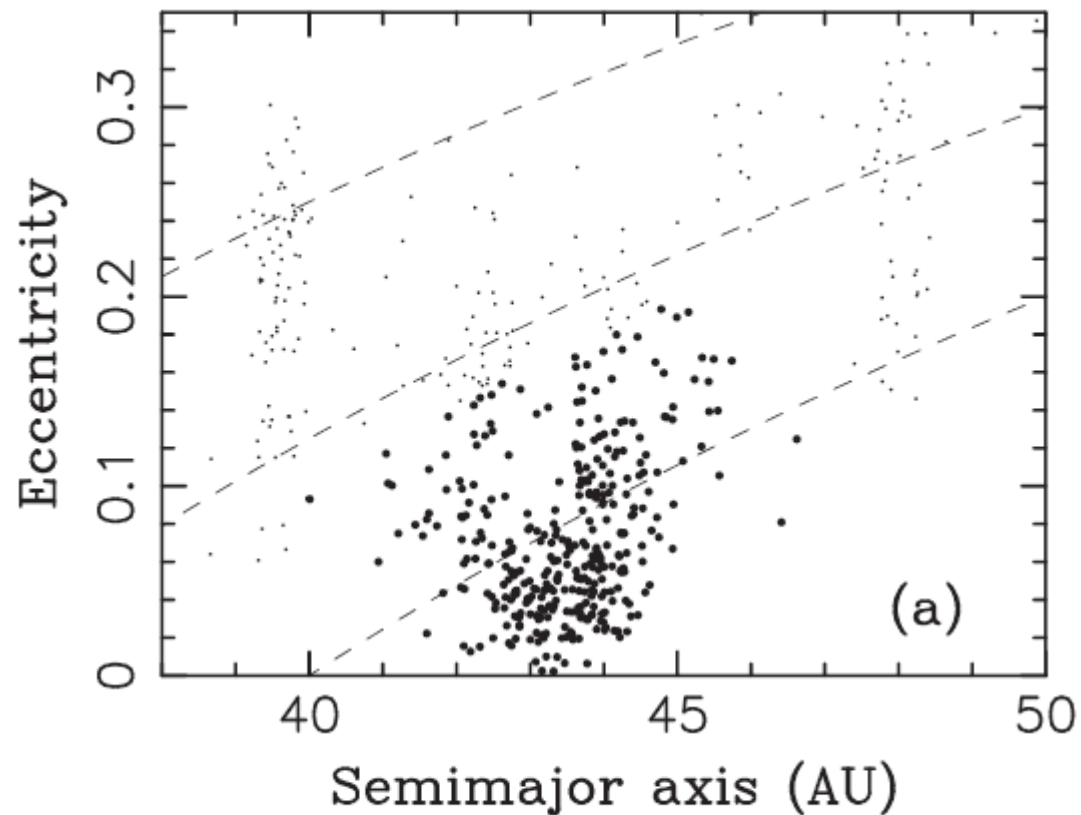


# Origine du Kernel de la population froide

Observé



Avec saut en  $a_N$  et bord primordial à 44 ua



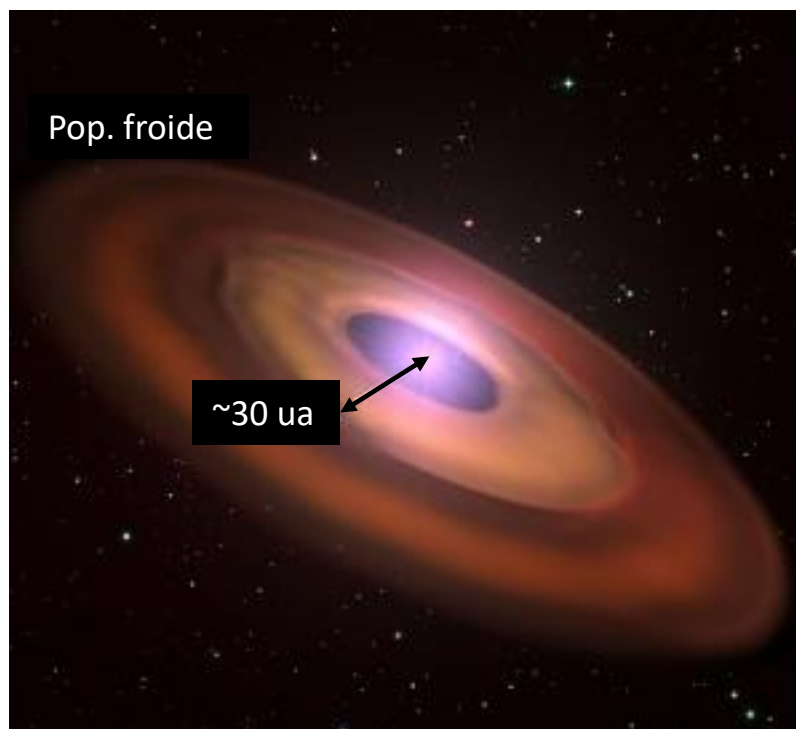
Nesvorny, AJ, 2015



## Conclusions sur la population froide

La population froide nous révèle que:

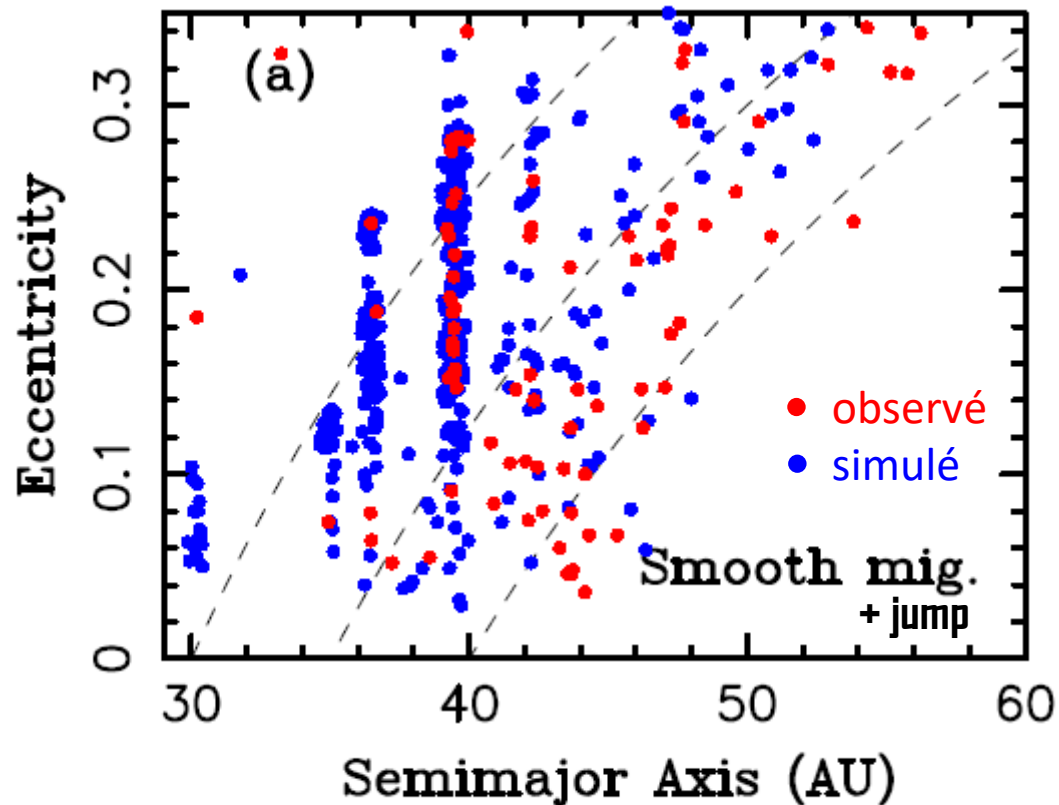
- Il y a bien eu une instabilité planétaire, qui a engendré un saut du demi grand axe de Neptune
- Le bord externe du disque primordial de planétésimaux était à  $\sim 44$  ua
- Il y avait un grand contraste de densité entre le disque  $< 30$  ua et dans la région 30-44 ua



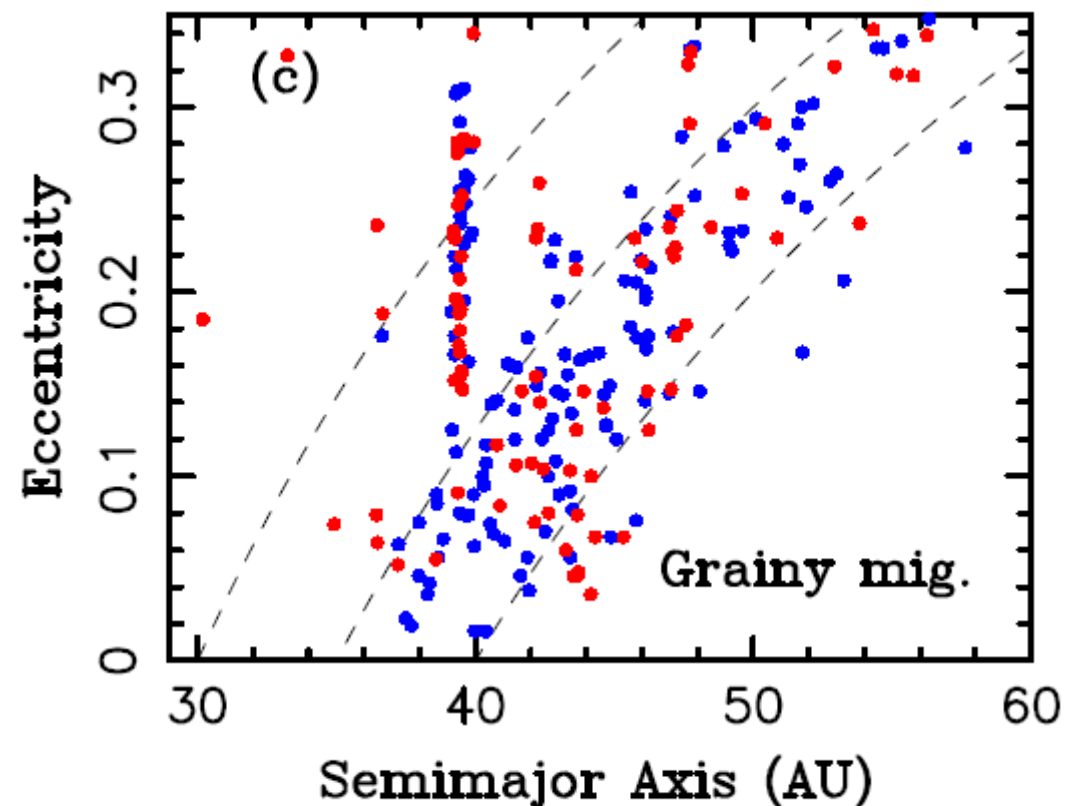




## Abondance relative des populations résonnantes



Les populations résonnantes et la population chaude sont apparentées, mais dans le modèle les premières sont surabondantes, même en prenant en compte le saut du demi grand axe de Neptune



Le problème disparaît si la migration de Neptune est chahutée par la rencontre avec des objets semi-massifs (ici 1.000 objets avec  $M = 2 M_{\text{Pluton}}$ )



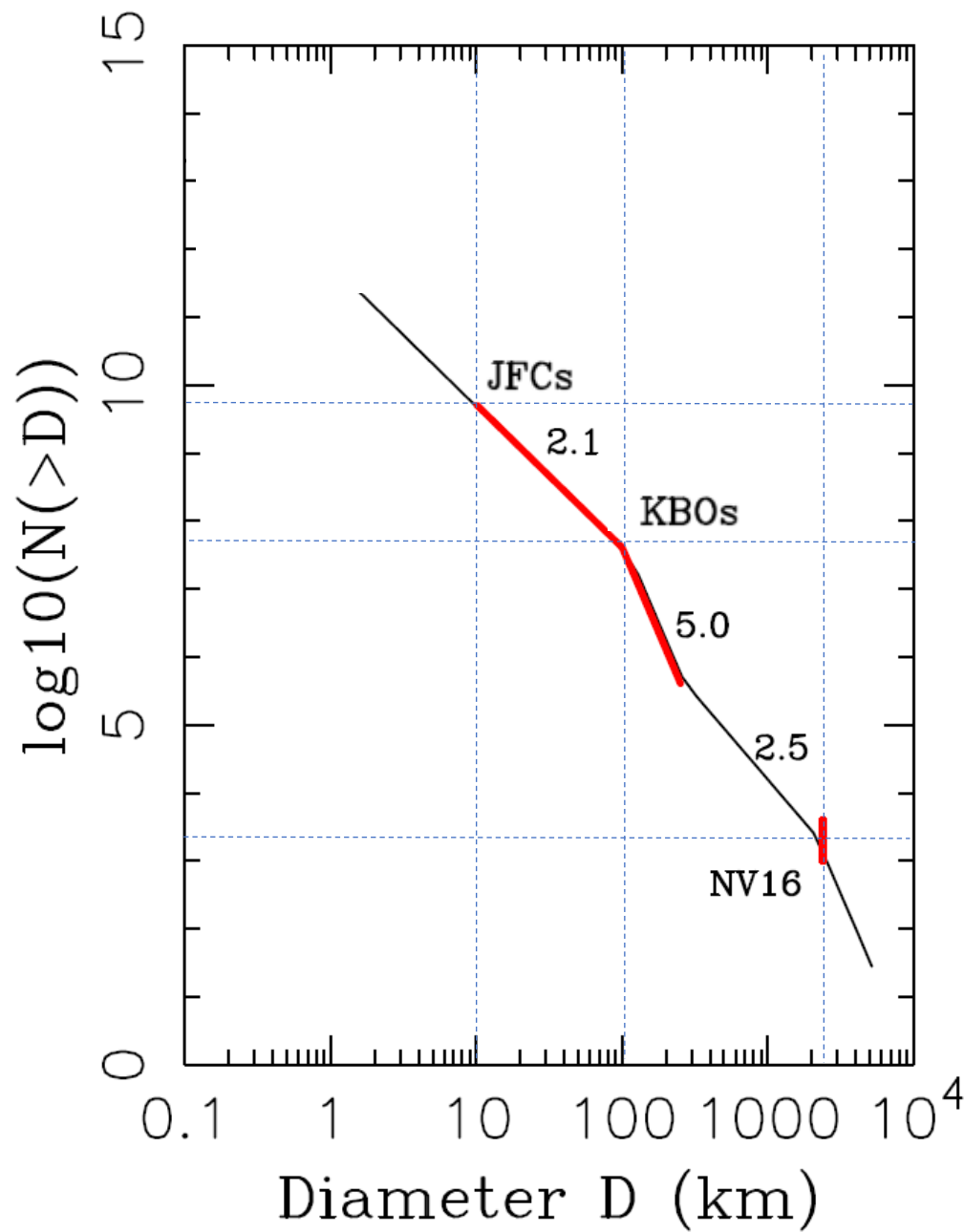
## Distribution des tailles des planétésimaux du disque trans-Neptunien

En résumant toutes les contraintes:

- $\sim 10^{10}$  objets de  $D > 10$  km
- $6 \pm 3 \times 10^7$  objets de  $D > 100$  km
- $2 \times 10^3$  objets de  $D > 2.500$  km

Cette distribution des tailles est en très bon accord à celle actuellement observée dans la population chaude, mais  $\sim 3.000$  fois supérieure

$\sim 85\%$  de ces objets ont été éjectés du système solaire lors de l'instabilité planétaire, en bombardant les planètes telluriques au passage





## A retenir

- Les modèles dynamiques permettent une reconstruction assez précise des différentes sous-populations trans-Neptuniennes: population chaude, dispersée, fossilisée, nuage d'Oort, populations résonnantes et population froide
- La migration vers l'extérieur de Neptune est la clef pour reproduire ces populations
- Mais l'existence du Kernel de la population froide nécessite une instabilité planétaire qui a changé impulsivement le demi grand axe de Neptune quand ce dernier était à 27,5 ua (modèle de Nice)
- Le disque trans-Neptunien originel contenait  $\sim 10^{10}$  objets de  $D > 10$  km,  $\sim 6 \times 10^7$  objets de  $D > 100$  km et  $\sim 2.000$  objets plus grand que Pluton. Un disque d'environ 30 masses terrestres.
- Environ 0,5% se retrouvent aujourd'hui dans le disque dispersé, 2,5% dans le disque fossilisé, 10% dans le nuage d'Oort, 0.03% dans les populations chaudes et résonnantes. Le restant a été perdu pour toujours (éjecté dans l'espace interstellaire)
- Ces objets se trouvaient essentiellement dans un disque étendu jusqu'à 30-35 ua
- Plus loin se trouvait un disque beaucoup moins massif, ancêtre de la population froide, étendu jusqu'à 44 ua, et rien au-delà.