



Leçon N. 8 – 11 Decembre 2024

Alessandro  
**MORBIDELLI**

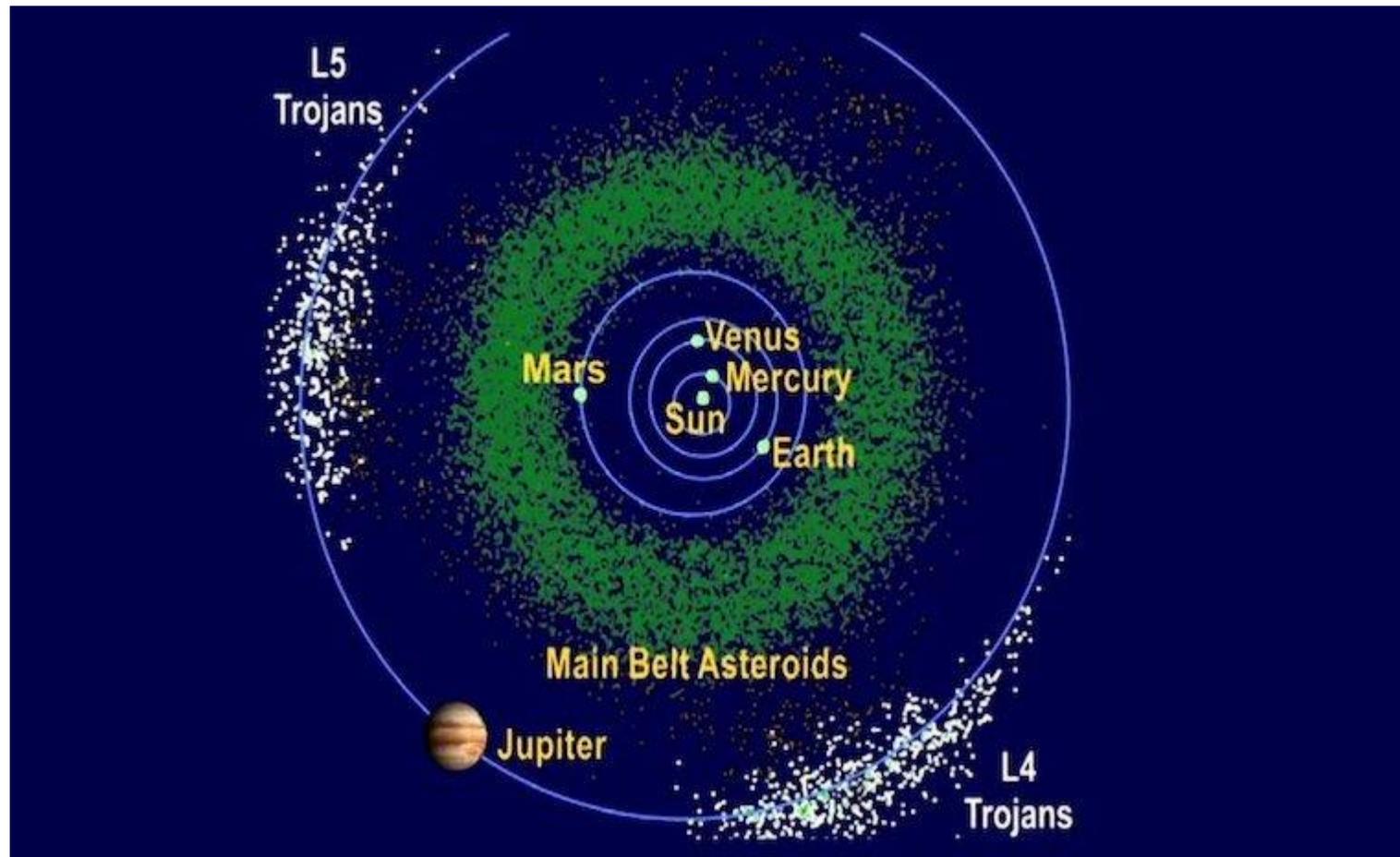
Chaire

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

***Origine et évolution du Système solaire externe:  
L'origine des Troyens de Jupiter et de Neptune et des satellites  
irréguliers des planètes géantes – évolution collisionnelle***



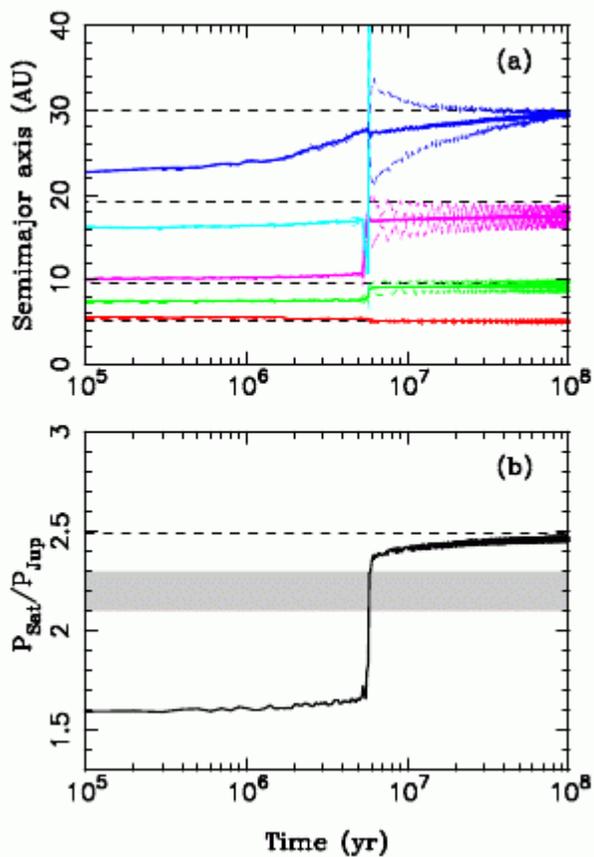
# Les Troyens de Jupiter



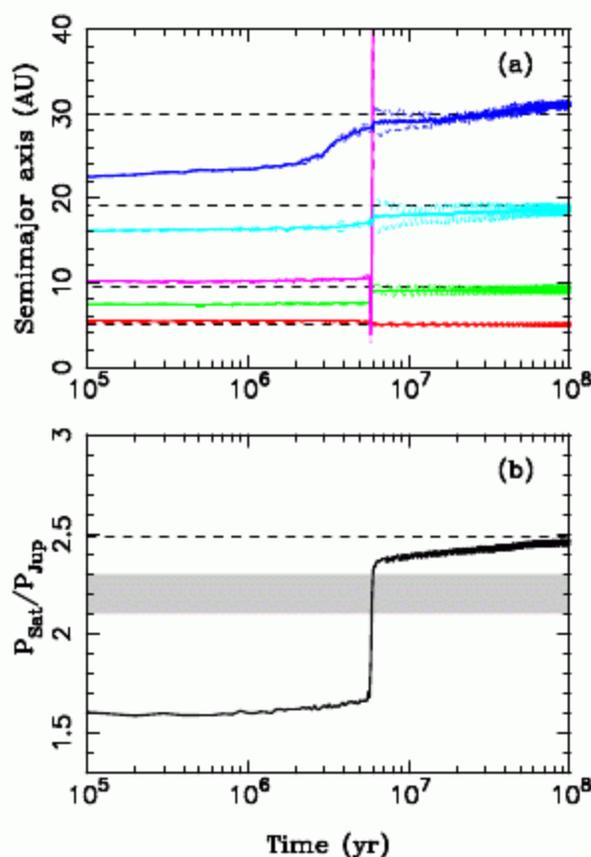


# Evolution des planètes géantes dans le cadre du nouveau modèle de Nice

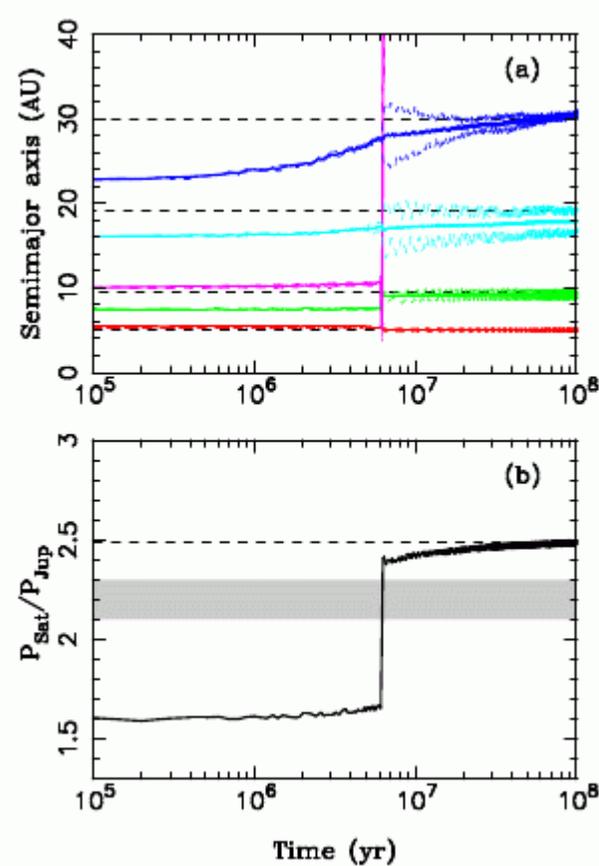
Simulations from Nesvorny and Morbidelli, 2012



case 1



case 2

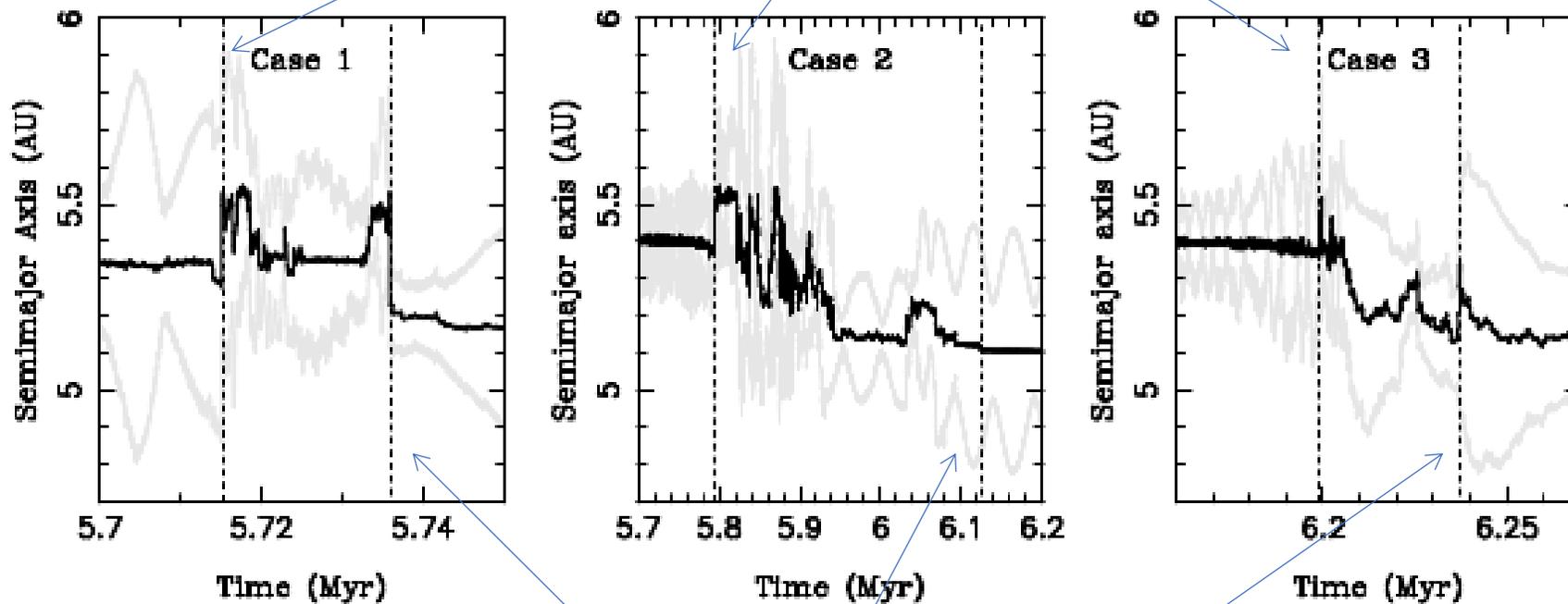


case 3



# Evolution de Jupiter

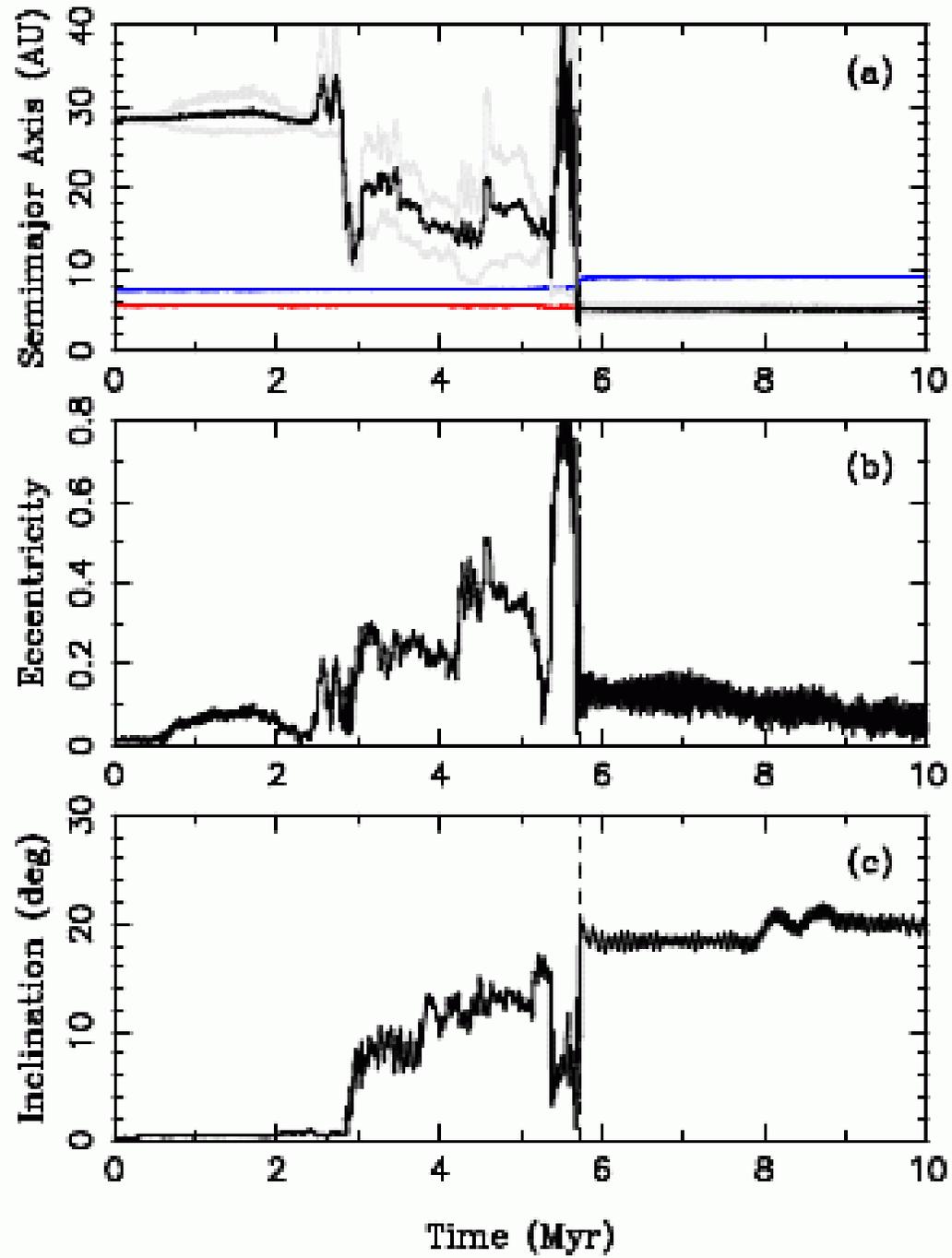
Début de la phase de rencontres proches



Fin de la phase de rencontres proches



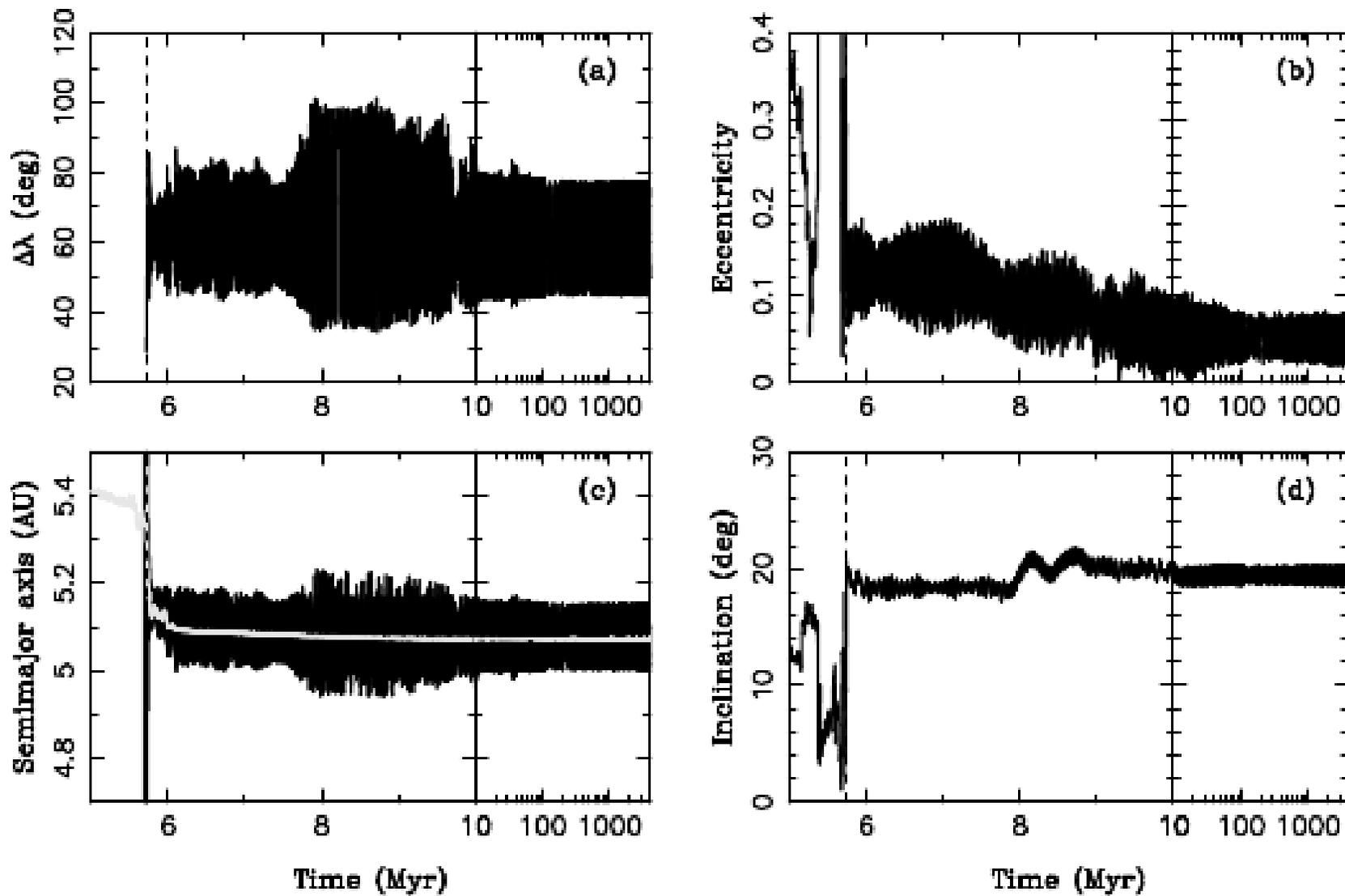
# Exemple d'évolution d'un objet trans-Neptunien capturé comme Troyen de Jupiter



Nesvorny, Vokrouhlicky and Morbidelli, 2013



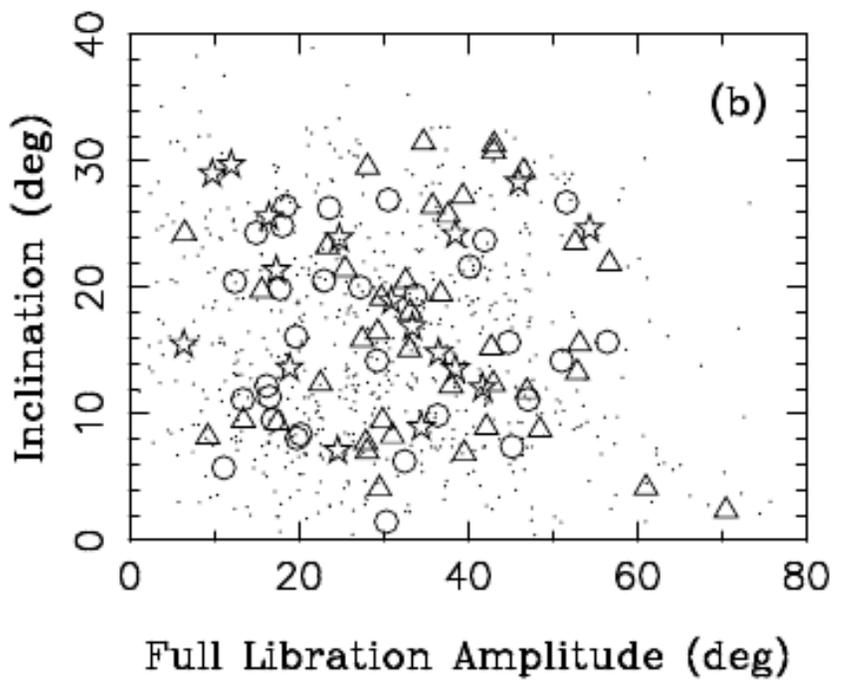
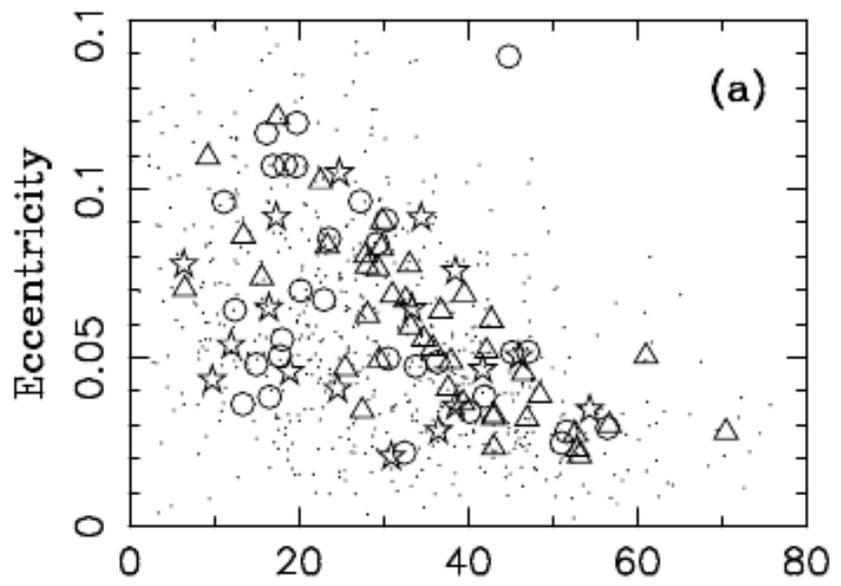
## Evolution dynamique après la capture





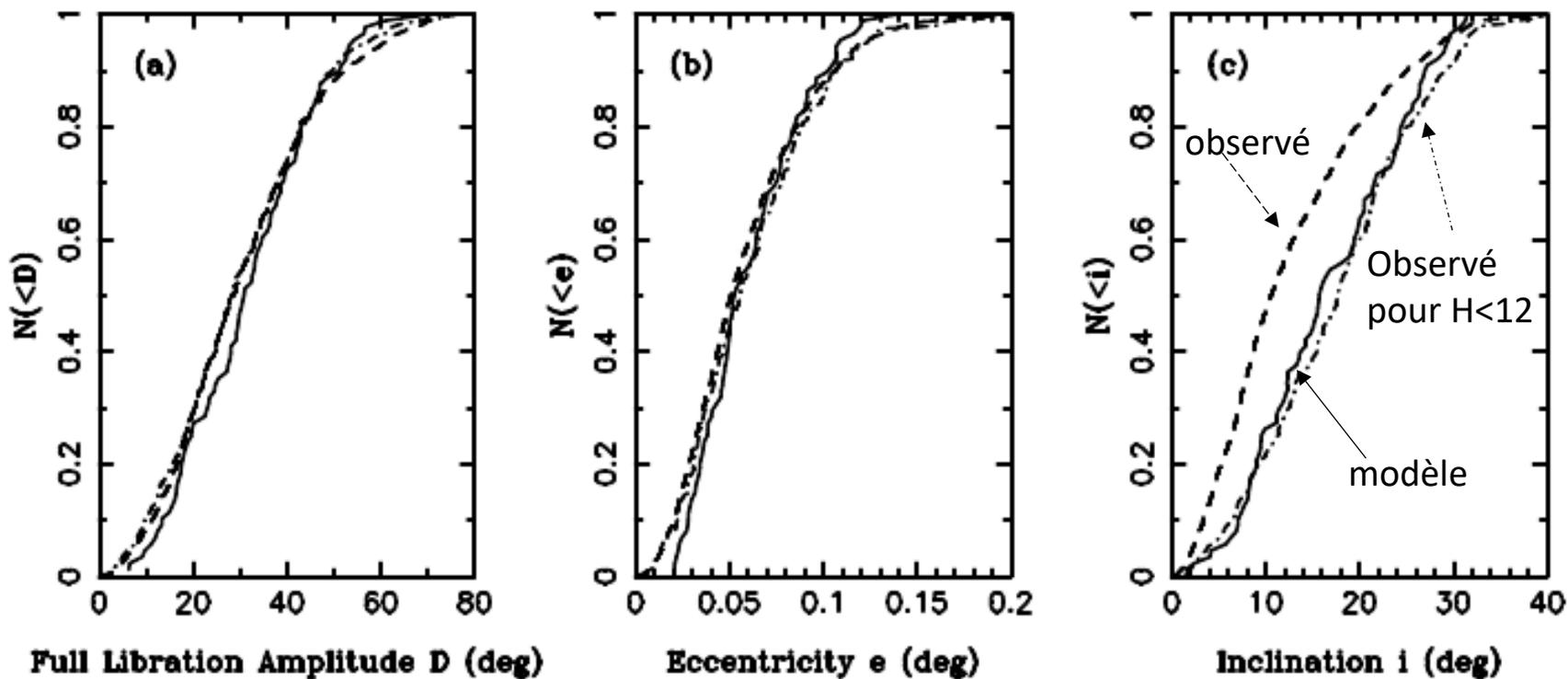
# Distribution finale des objets capturés qui survivent jusqu'à nos jours

- Troyens réels
- Case 1
- △ Case 2
- ☆ Case 3





## Comparaison quantitative



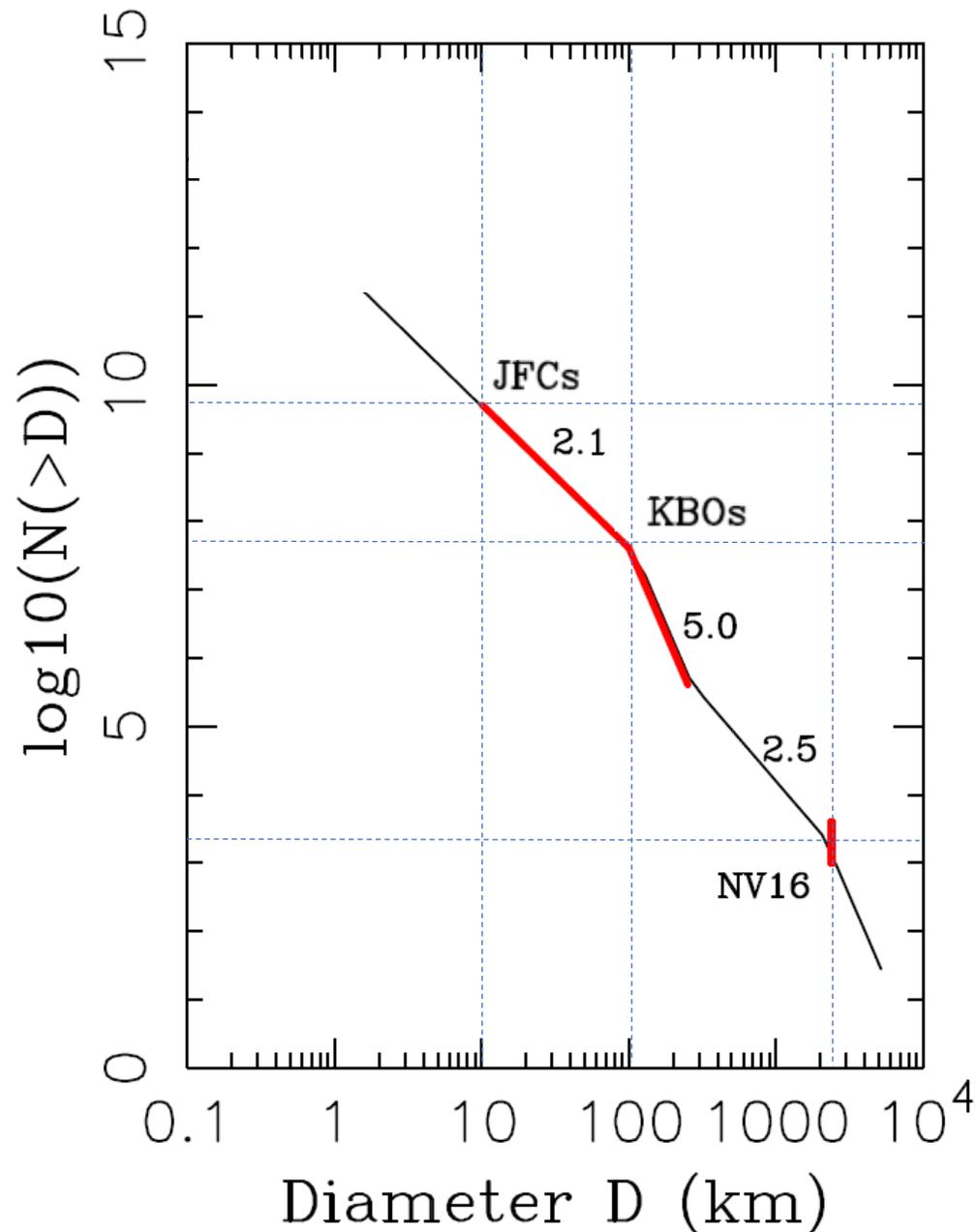
**Probabilité de capture:  $6-8 \times 10^{-7}$  par particule dans le disque trans-neptunien**



## Nombre total d'objets et distribution des tailles

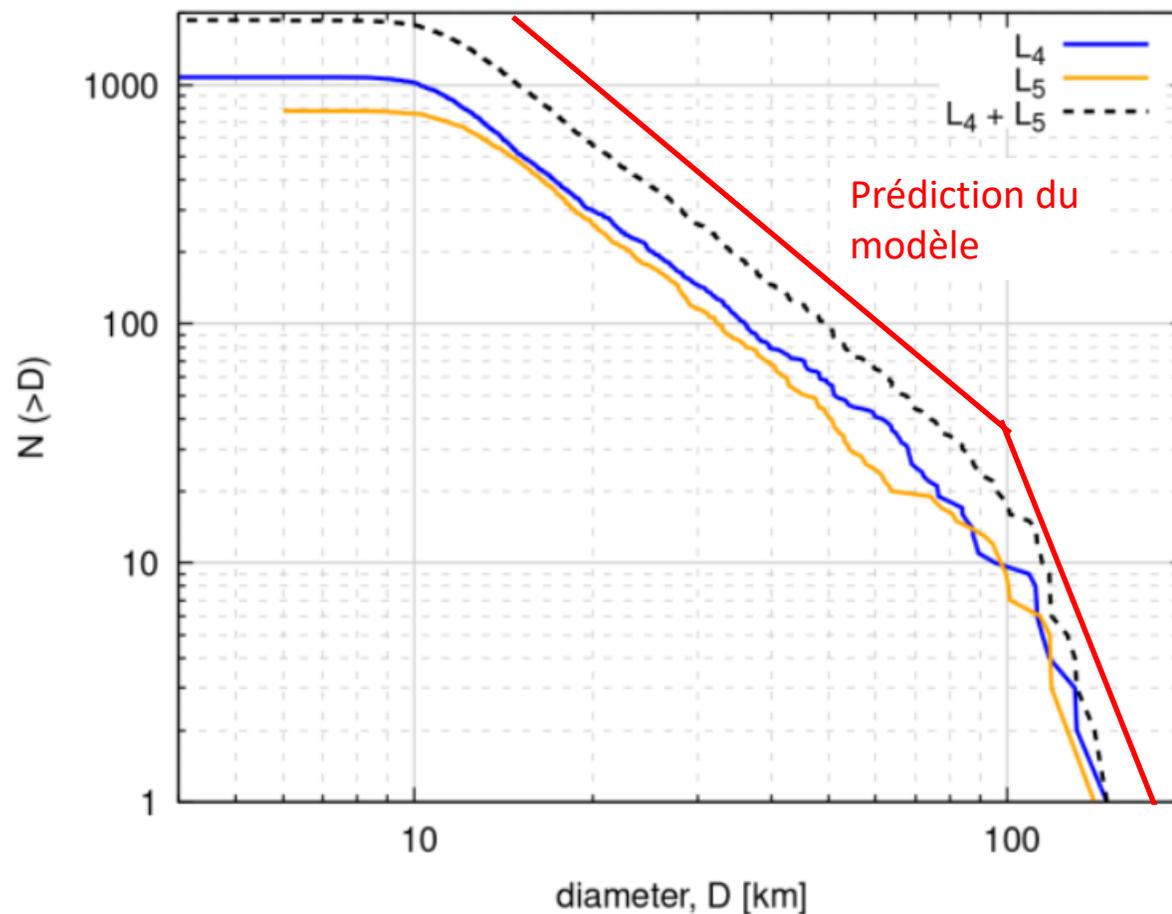
On prend comme référence la distribution des tailles du disque trans-Neptunien originel, contrainte à partir des probabilités de capture et des populations observées/déduites dans le disque dispersé, la population chaude, les populations résonnantes.

Cette distribution est ensuite multipliée par la probabilité de capture comme Troyen de Jupiter:  $6-8 \times 10^{-7}$





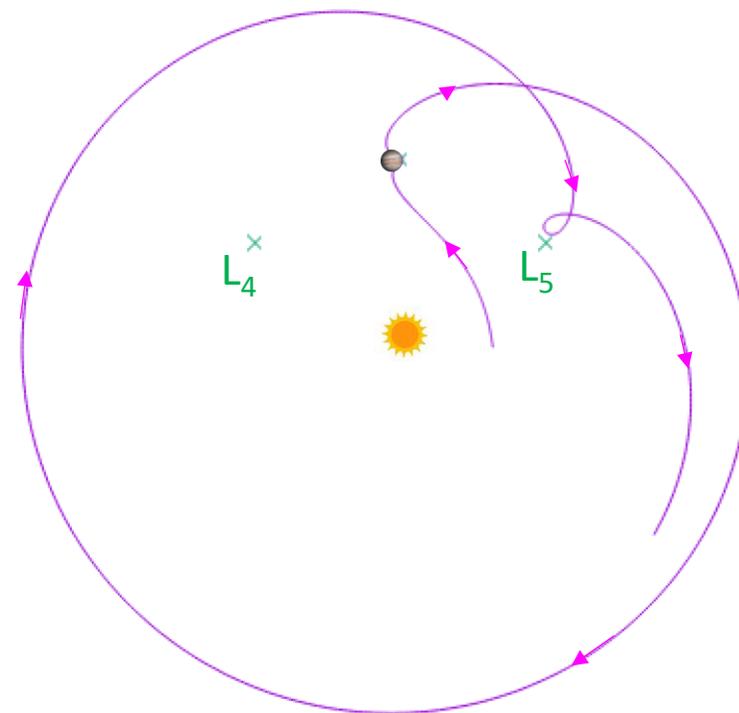
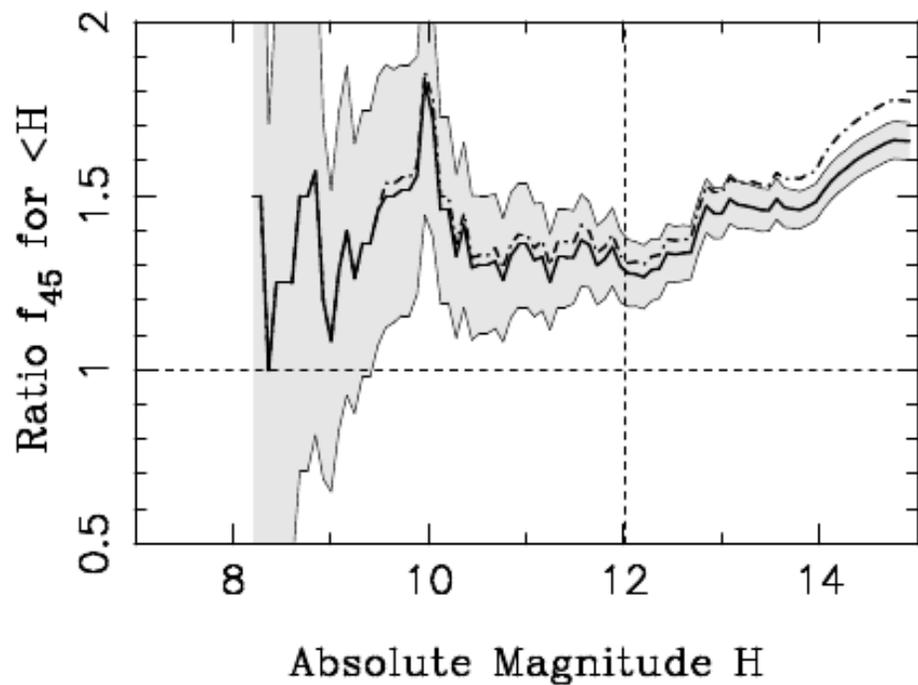
## Nombre total d'objets et distribution des tailles



Prédiction du modèle: modèle du disque (voir leçon précédente) x probabilité de capture  
Reproduit les observations à un facteur  $\sim 2$  près (surestimation du nombre d'objets capturés).



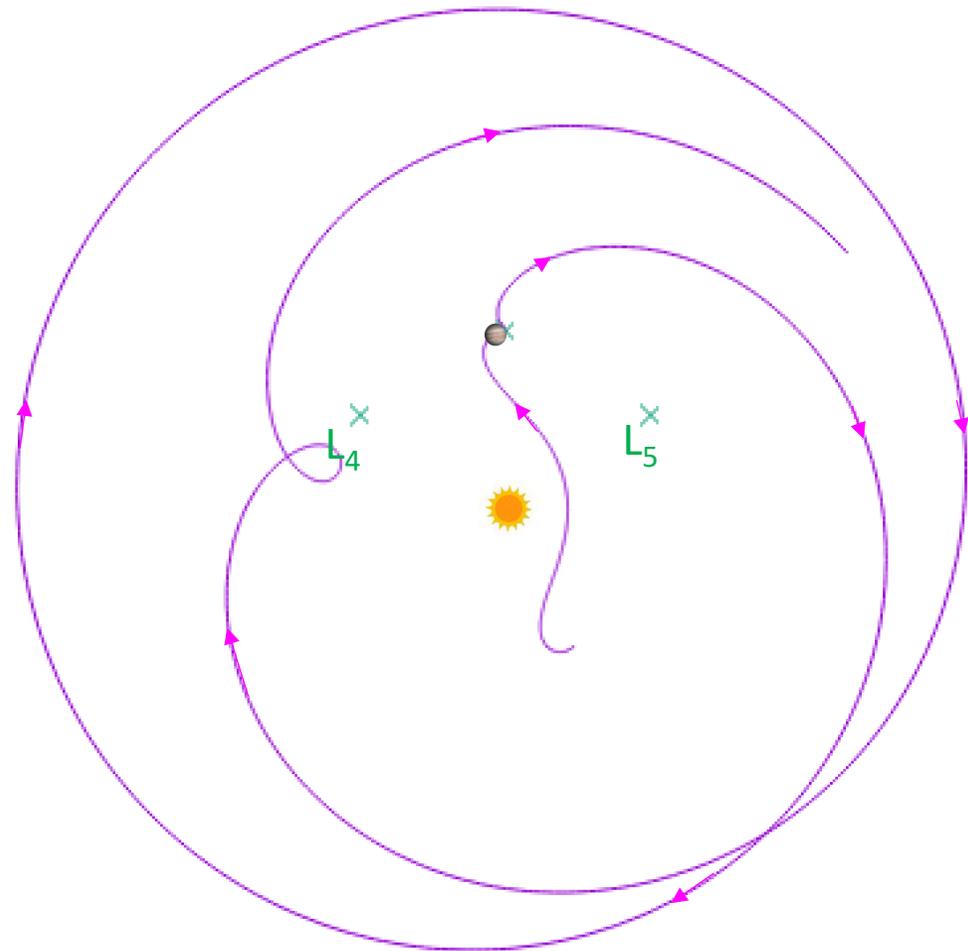
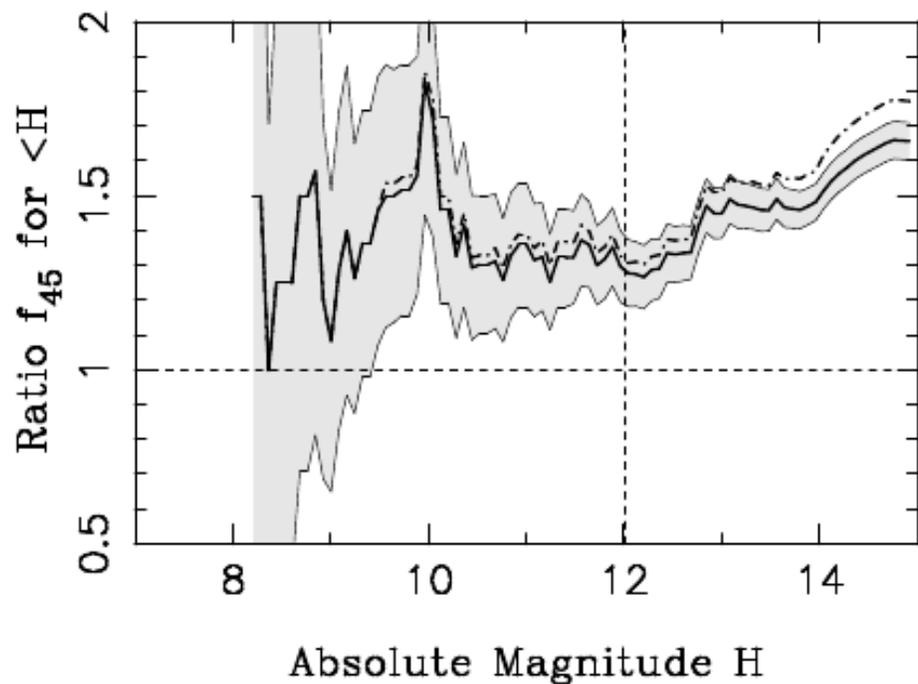
## Origine de l'asymétrie $L_4 - L_5$



Selon la trajectoire spécifique de la planète après la rencontre avec Jupiter, la survie des Troyens autour de  $L_5$  ou  $L_4$  peut être davantage déstabilisée



## Origine de l'asymétrie $L_4 - L_5$



Selon la trajectoire spécifique de la planète après la rencontre avec Jupiter, la survie des Troyens autour de  $L_5$  ou  $L_4$  peut être davantage déstabilisée



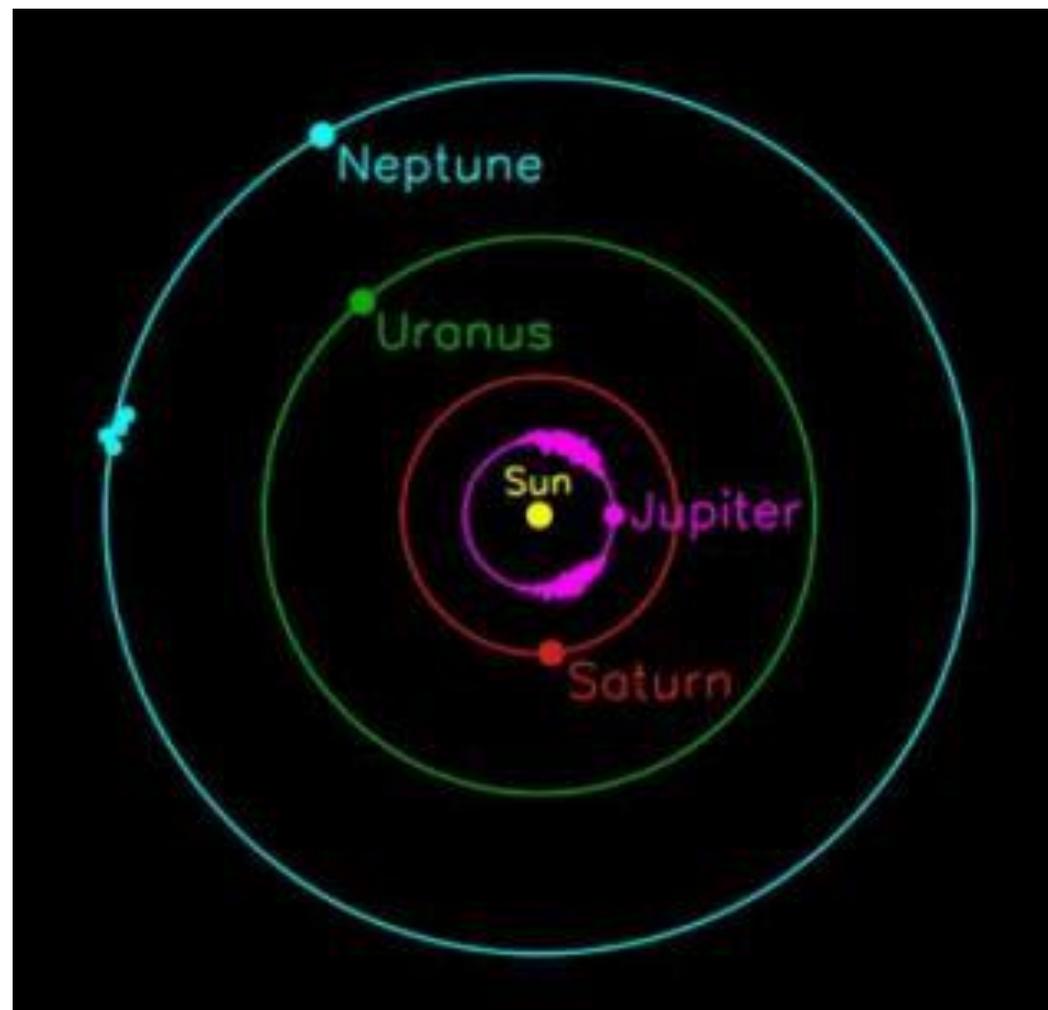
## Les Troyens de Neptune

Premier objet découvert en 2001 par M. Buie

Aujourd'hui: 27 objets connus autour de  $L_4$ , 4 autour de  $L_5$

Cette asymétrie est probablement due aux biais observationnels, mais en partie elle pourrait être vraie, comme pour les Troyens de Jupiter.

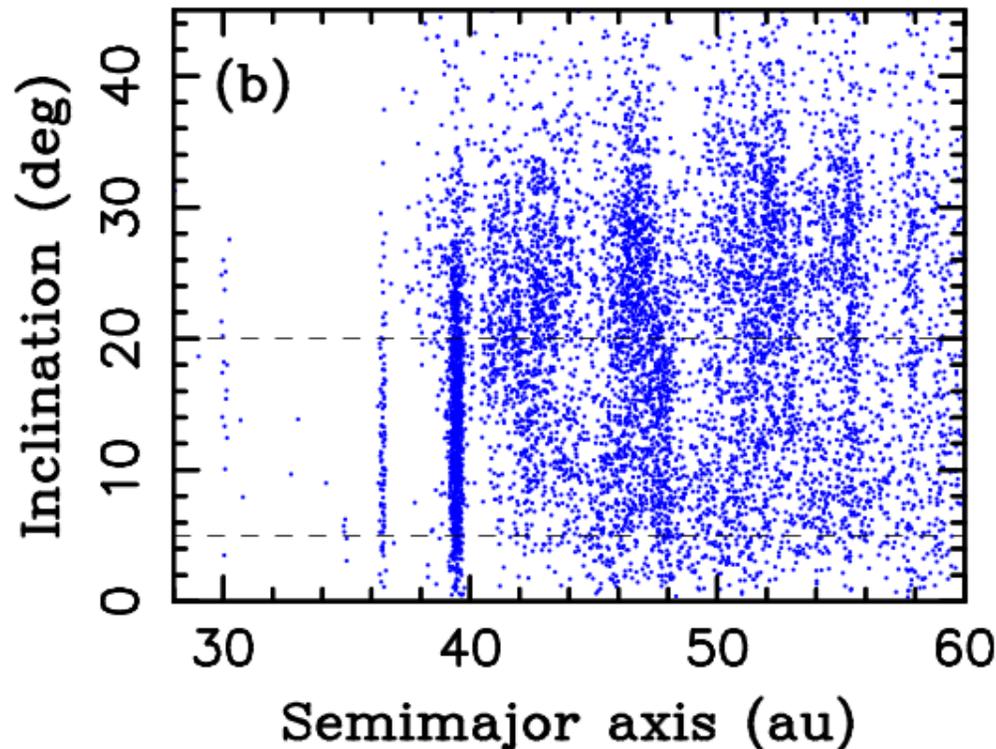
Grandes inclinaisons, jusqu'à  $40^\circ$ , comme pour les Troyens de Jupiter





## Capture des Troyens de Neptune

Comme pour les Troyens de Jupiter, la capture des Troyens de Neptune a vraisemblablement lieu quand Neptune “saute” de 37,5 à 38 ua (comme contraint par l’existence du Kernel dans la population froide)



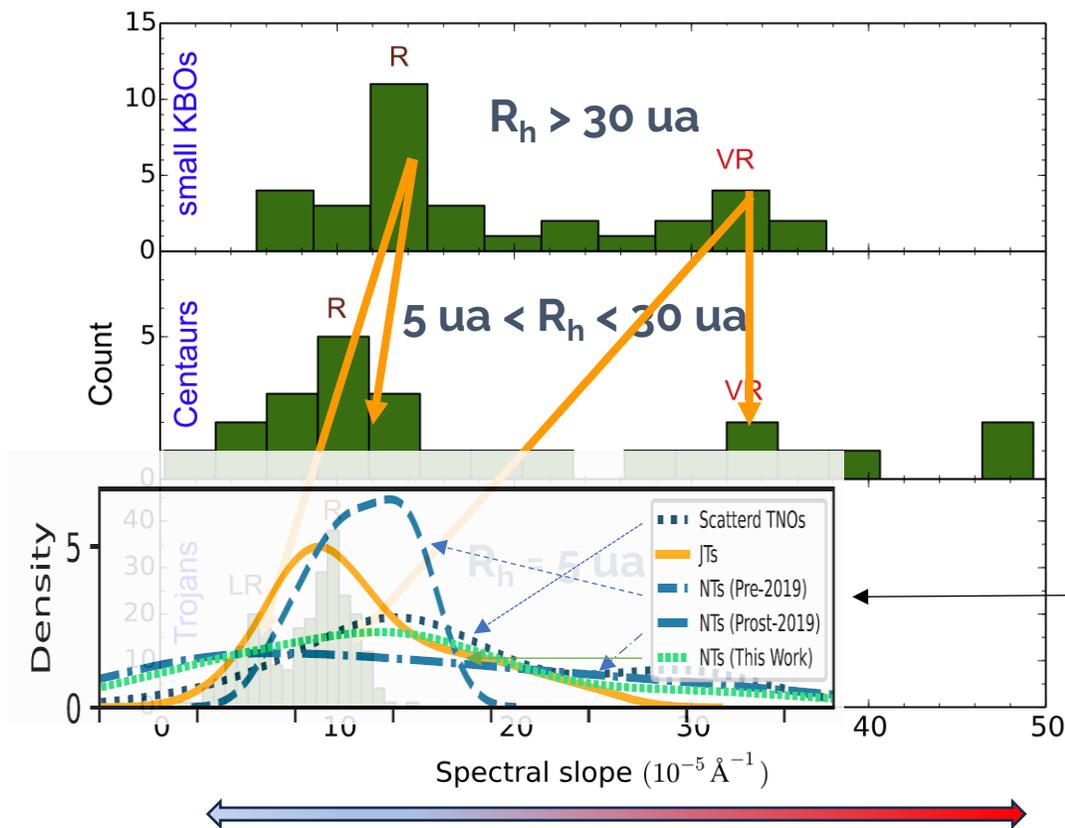
Nesvorny et al. (2020)

La capture est aussi possible pendant la phase de migration résiduelle: Nesvorny et Vokrouhlicky (2009), Lykawka et al. (2011), Parker (2015), Gomes et Nesvorny (2016)

Le nombre d’objets capturés est très sensible à l’évolution du rapport  $P_N/P_U$



# Les couleurs des Troyens par rapport aux objets trans-Neptuniens

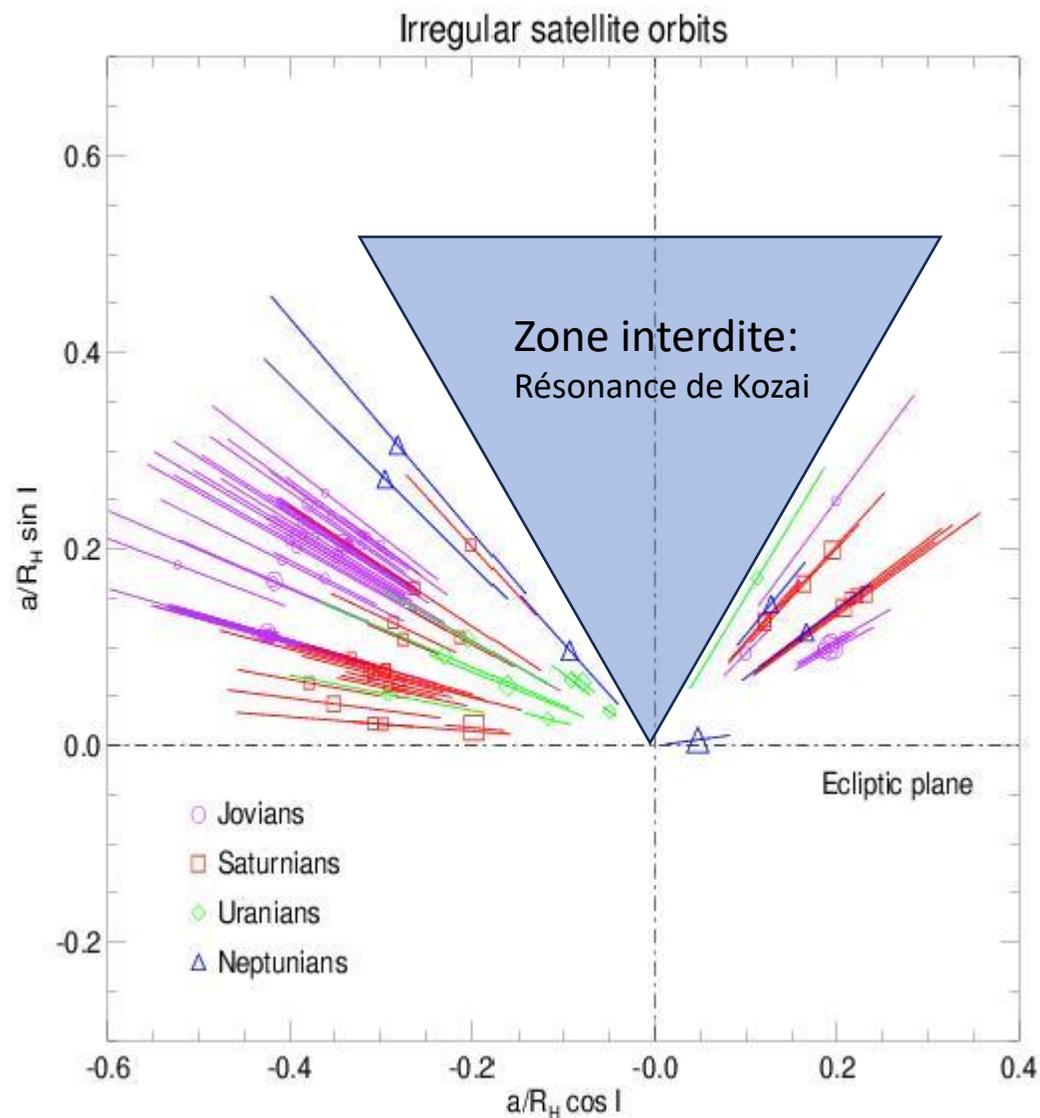


Wong & Brown 2016 proposent que ça soit juste un effet de l'irradiation solaire

Lantz et al. (2018) confirment que l'irradiation provoque le bleuissement d'objets carbonés



## Les satellites “irréguliers”



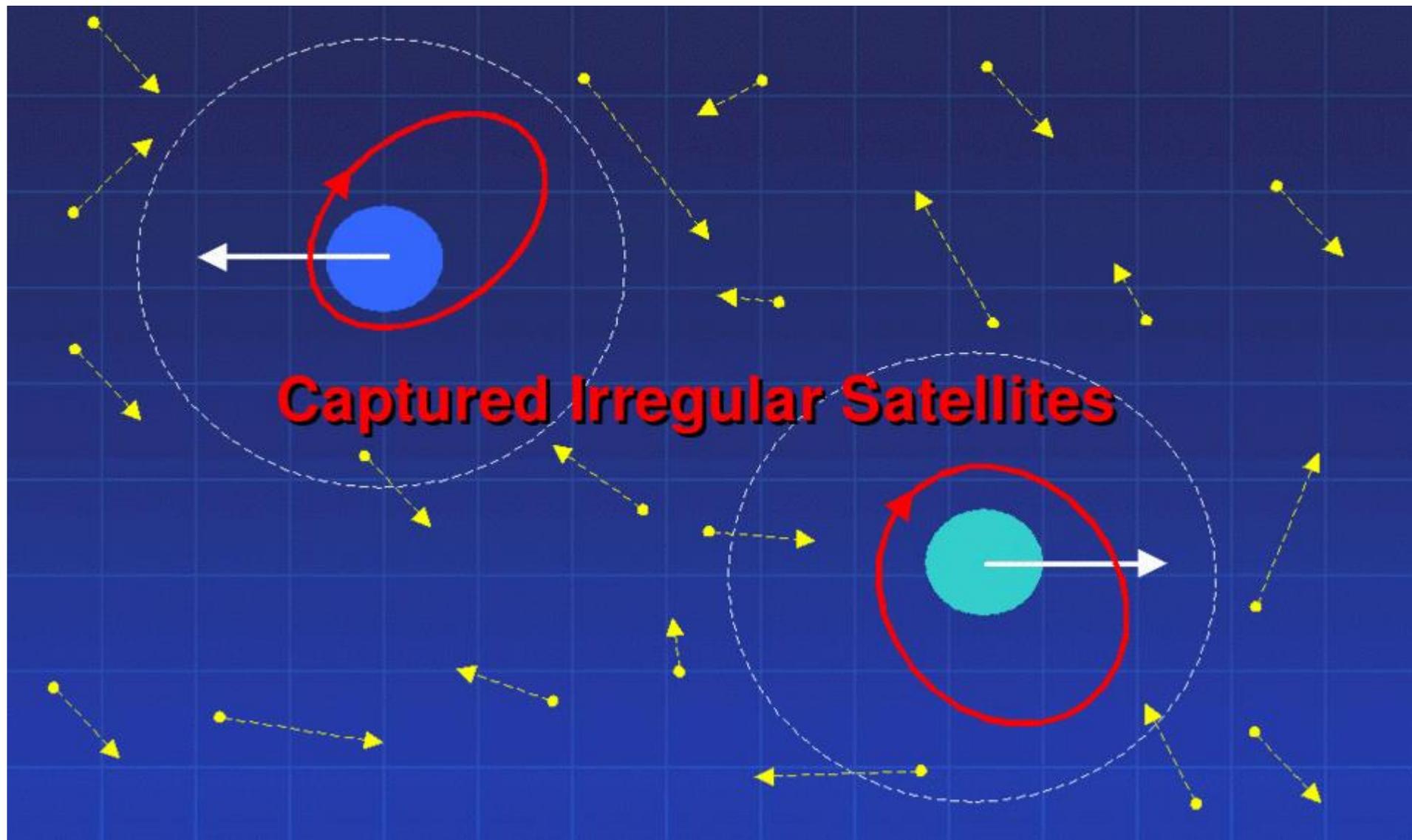
Les populations de satellites irréguliers autour des 4 planètes géantes, par rapport à la taille du rayon de Hill respectif des planètes, sont à peu près les mêmes.

$$R_H = a \left( \frac{M}{3M_*} \right)^{1/3}$$

Cela suggère que c'est la gravité seule qui a joué le rôle principal dans leur capture, et non pas le frottement du gaz ou la croissance de la masse de chaque planète (Jewitt et Sheppard, 2005).

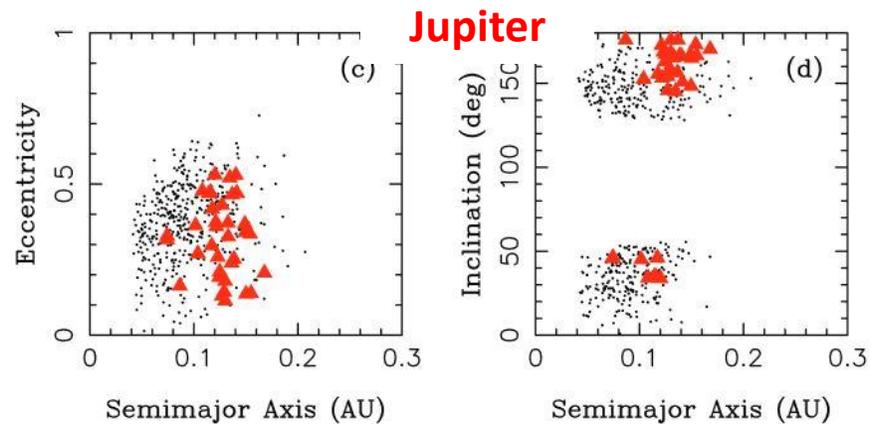
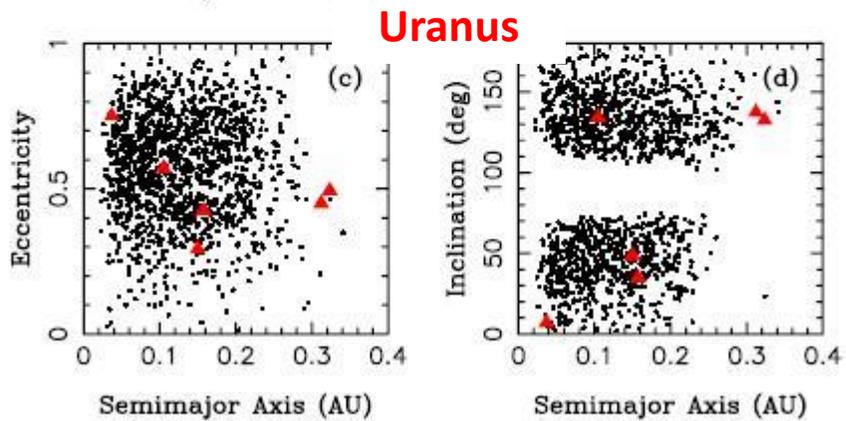
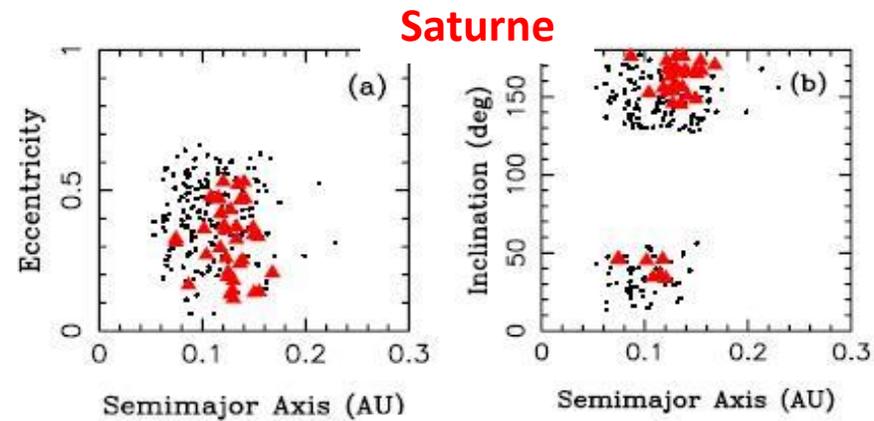
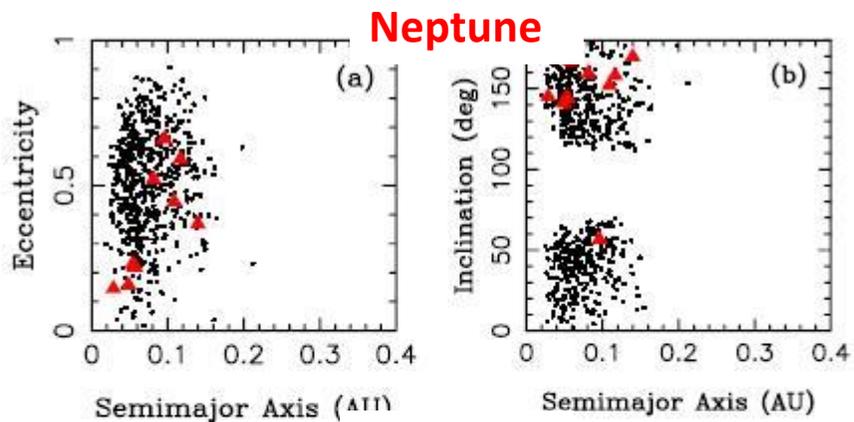


## Le processus de capture lors des rencontres planétaires



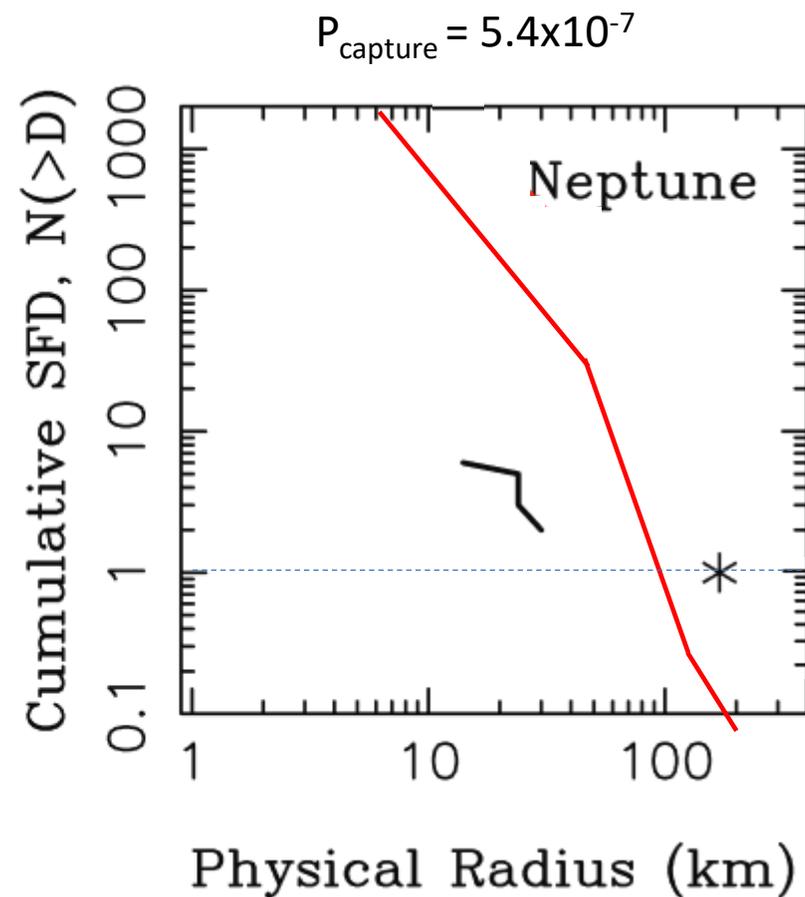
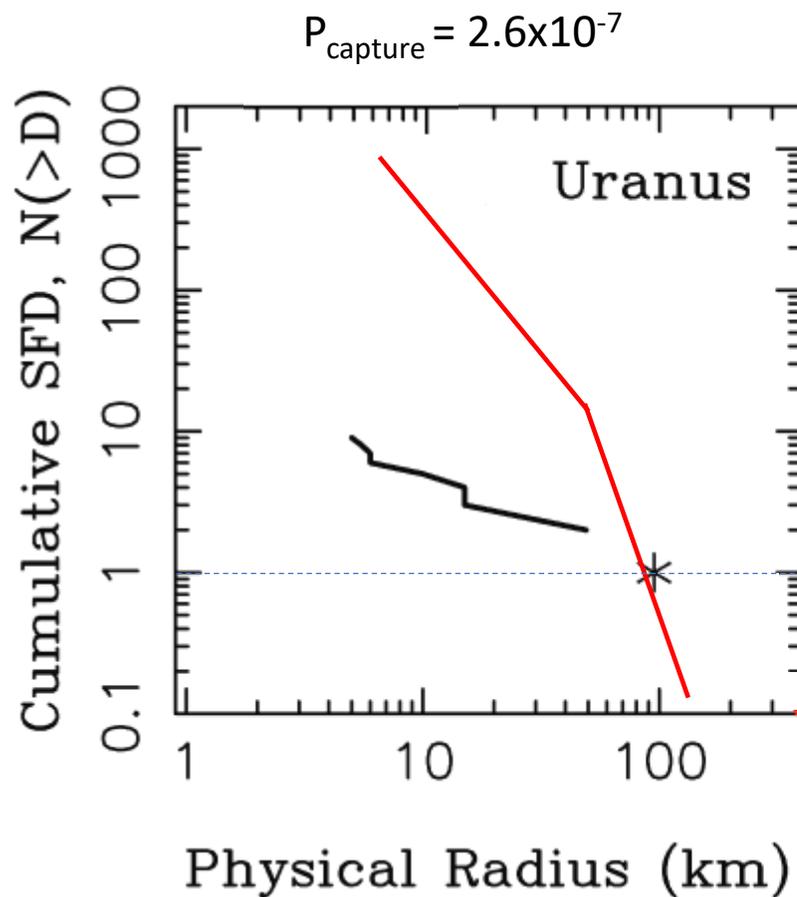


# Distribution orbitale des objets capturés



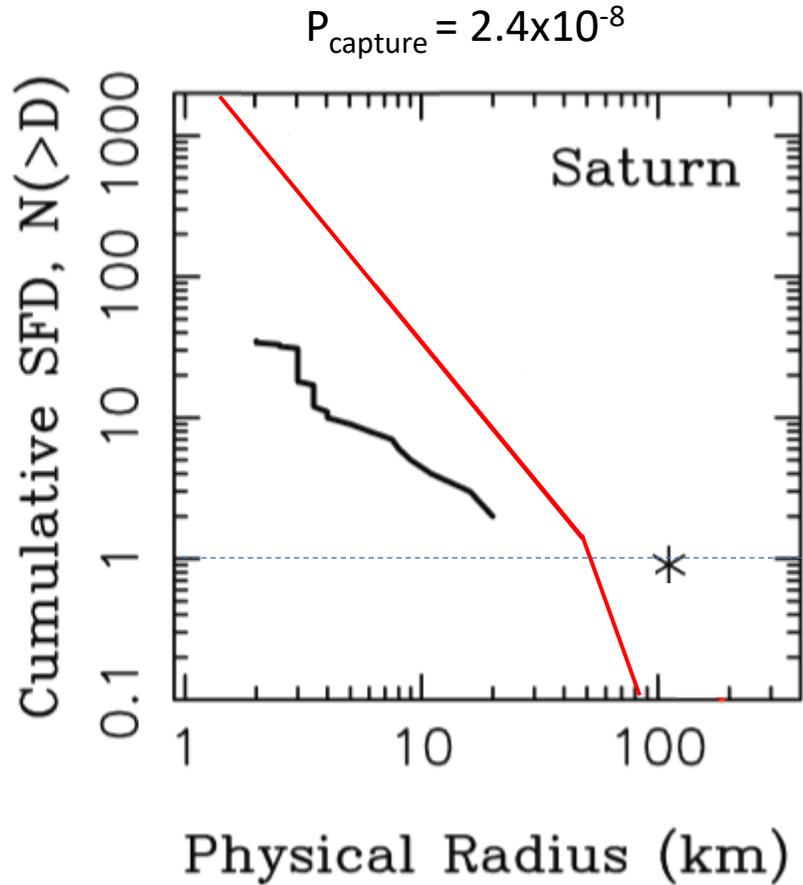
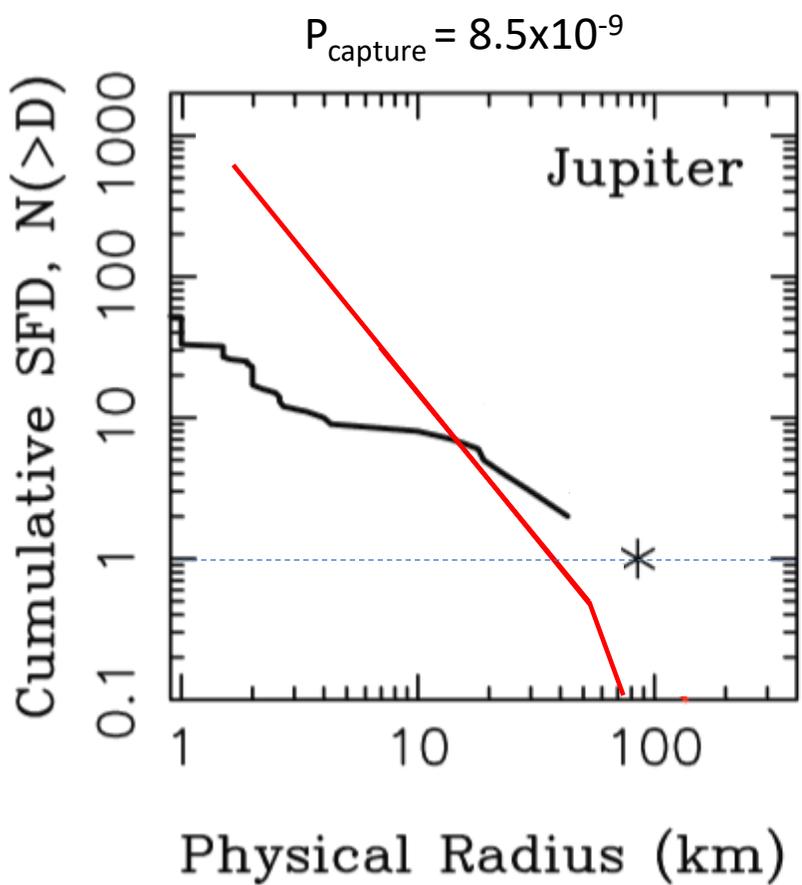


## Probabilités de capture et distributions des tailles





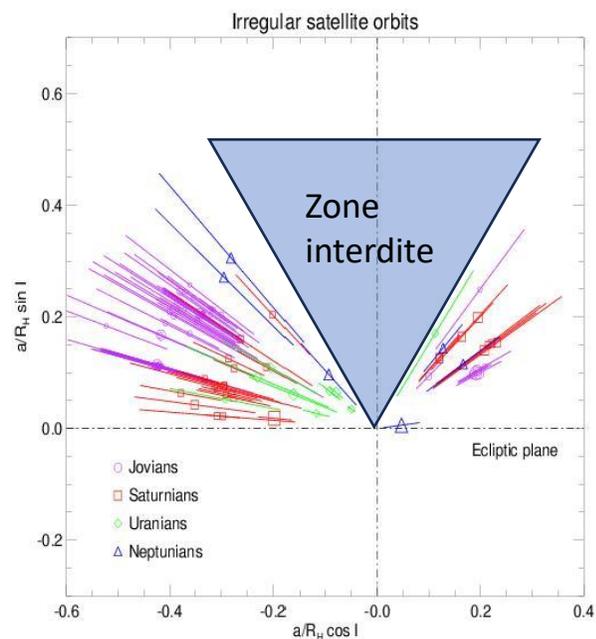
# Probabilités de capture et distributions des tailles





## Possible causes de ces désaccords

- Le satellite irrégulier majeur de chaque planète est plus gros que celui attendu par le modèle
  - Les évolutions planétaires considérées ne correspondent pas tout à fait à la réalité
  - Statistique des petits nombres
  - Un mécanisme supplémentaire aidant à la capture, par exemple la friction due à une atmosphère étendue autour des planètes, possible si l'instabilité était précoce.



La friction gazeuse pourrait permettre de stabiliser les objets capturés dans la zone interdite, en empêchant leur excentricité de trop grandir quand l'inclinaison est réduite par l'effet Kozai



## Possible causes de ces désaccords

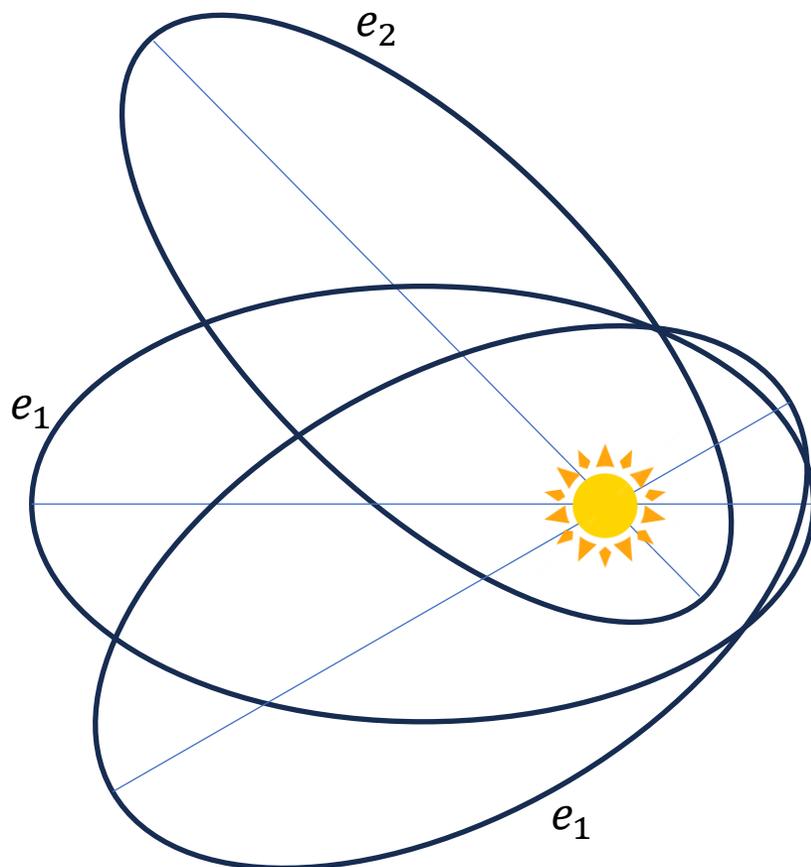
- Le satellite irrégulier majeur de chaque planète est plus gros que celui attendu par le modèle
  - Les évolutions planétaires considérées ne correspondent pas tout à fait à la réalité
  - Statistique des petits nombres
  - Un mécanisme supplémentaire aidant à la capture, par exemple la friction due à une atmosphère étendue autour des planètes, possible si l'instabilité était précoce.
- La distribution des tailles des satellites irréguliers est bien moins raide que celle de la population source
  - L'évolution collisionnelle de la population des satellites après leur capture



# Evolution collisionnelle



## Vitesse relatives de collision



Des corps sur des orbites elliptiques et/ou inclinées se croisent avec une vitesse relative

$$v_{rel} = v_K \sqrt{\frac{5}{4} e^2 + \sin(i)^2} \text{ ou } v_K = \sqrt{GM/a}$$

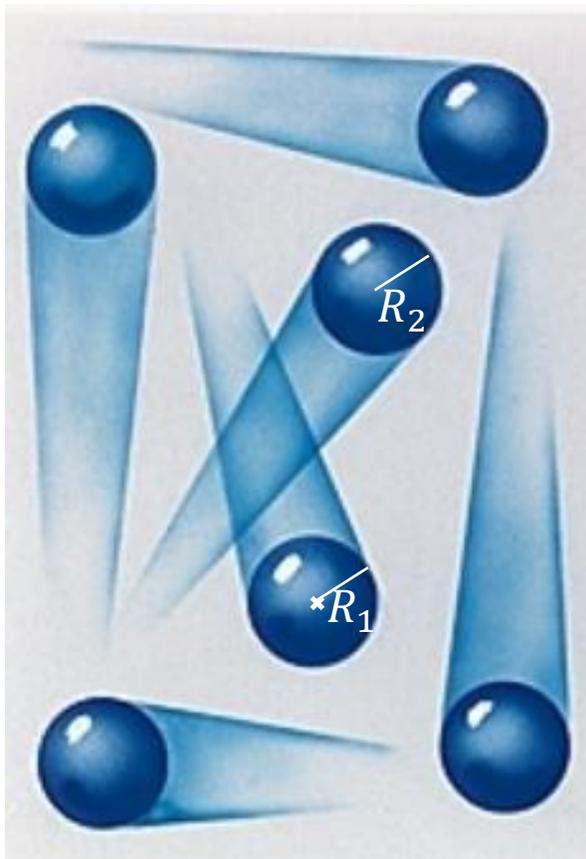
Si  $e$  ou  $\sin(i)$  différents, prendre la moyenne:

$$e_{moy}^2 = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2),$$

$$\sin(i_{moy})^2 = \frac{1}{2} (\sin(i_1)^2 + \sin(i_2)^2)$$



## Fréquence des collisions



Pour une particule donnée, le nombre de collisions par unité de temps est:

$$N_{coll} = N\sigma v_{rel}$$

où:

- $N$  nombre de particules (projectiles) par unité de volume
- $\sigma = \pi R^2$  est la section efficace de collision
- $R = R_1 + R_2$  la distance de collision
- $v_{rel}$  la vitesse relative



## Effets des collisions

Catastrophique: plus de la moitié de la masse est libérée dans l'espace



Sub-catastrophique: moins de la moitié de la masse est libérée dans l'espace





## Collisions catastrophiques

On définit  $Q_D^*$  l'énergie minimale par unité de masse nécessaire pour fragmenter catastrophiquement la cible de rayon  $D$

L'énergie totale nécessaire est donc  $E_{frag} > Q_D^* \rho \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3$ ,  $\rho$  étant la densité des corps

L'énergie cinétique d'un projectile est  $E = \frac{1}{2} \rho \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3 v_{rel}^2$

Il faut donc que le projectile ait une taille  $D_p > D [2Q_D^*/v_{rel}^2]^{1/3}$

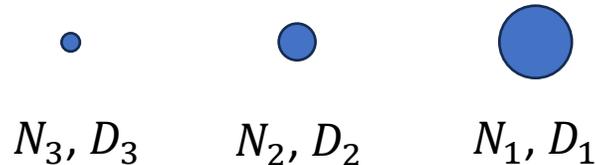
Si  $Q_D^* = Q_0^*$  est indépendant de  $D$ , alors  $D_p/D > [2Q_0^*/v_{rel}^2]^{1/3}$ , indépendant de  $D$



## Distribution des tailles à l'équilibre collisionnel

$$Q_D^* = Q_0^*$$
$$D_p/D > [2Q_0^*/v_{rel}^2]^{1/3} \equiv r_D$$

$$D_3/D_2 = r_D \quad D_2/D_1 = r_D$$

$D_2$  détruit  $D_1$ ,  $D_3$  détruit  $D_2$ , etc.  
Les fragments de  $D_1$  ont taille  $D_2$ , etc

Calcul simplifié (inspiré par Paolicchi, 1994, PSS):

$$\dot{N}_1 = -v_{rel} \pi \frac{1}{4} D_1^2 N_2 N_1$$

$$\dot{N}_2 = -v_{rel} \pi \frac{1}{4} D_2^2 N_3 N_2 + v_{rel} \pi \frac{1}{4} D_1^2 N_2 N_1 r_D^{-3}$$

$$\dot{N}_3 = \dots$$

$N_1$  diminue sans cesse (la population s'érode)

$$(N_2/\dot{N}_1) = r_D^2 \frac{N_3}{N_1} - r_D^{-3}$$

On suppose une distribution en lois de puissance:  $N_{i+1} = N_i r_D^{-q}$

$$(N_2/\dot{N}_1) = r_D^2 r_D^{-2q} - r_D^{-3}$$

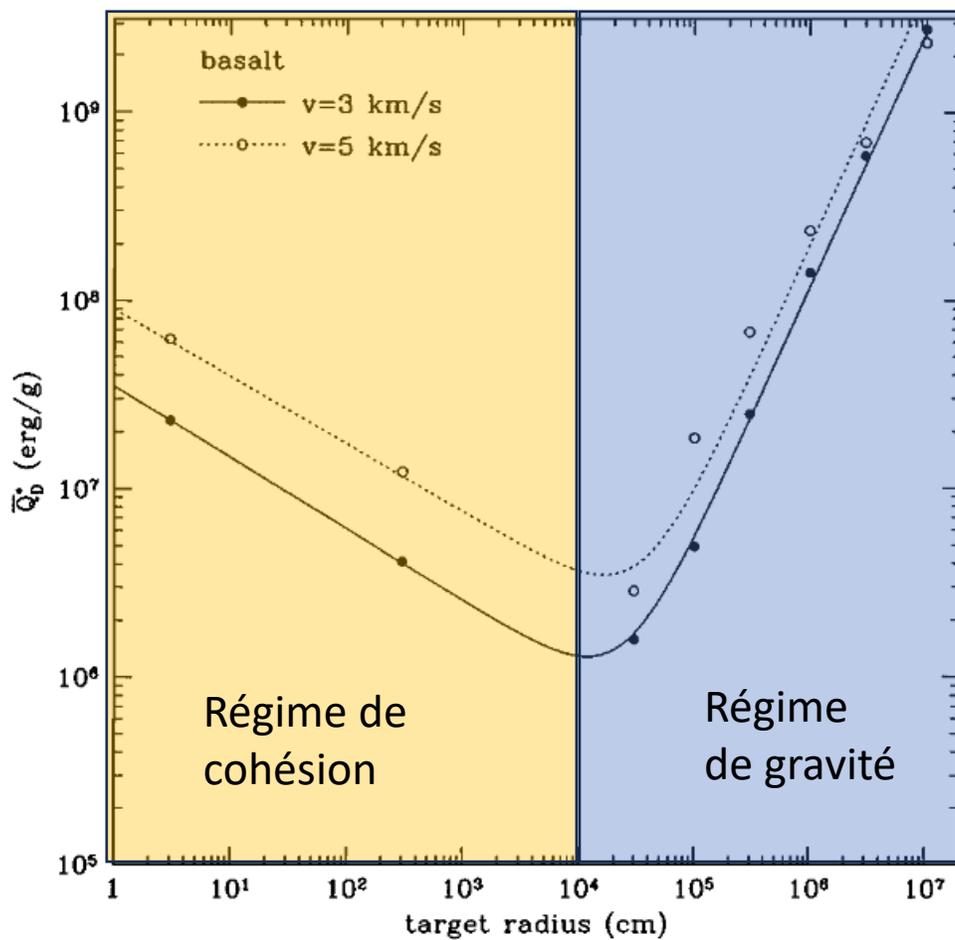
On dit que la population est à l'équilibre collisionnel si  $(N_2/\dot{N}_1) = 0$

Ceci est possible si et seulement si  $2 - 2q = -3$   
 $q = 5/2$  **exposant de Dohnany** (Dohnany, 1969)

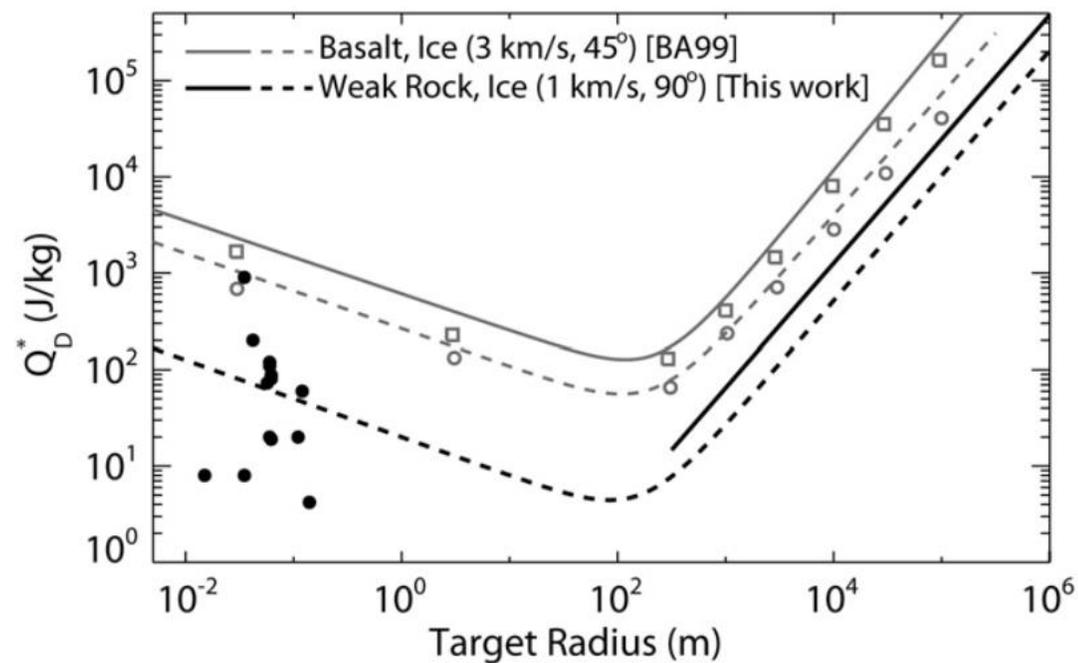


# La fonction $Q_D^*$

$Q_D^*$  : pas indépendant de R !



Benz et Asphaug, 1999



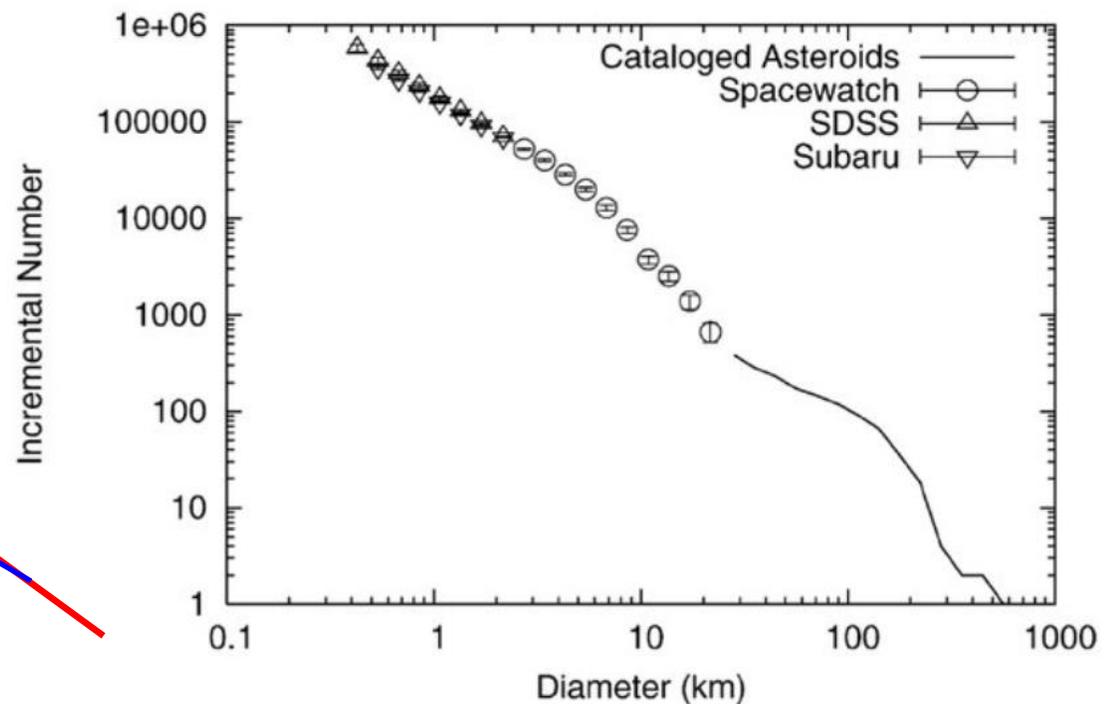
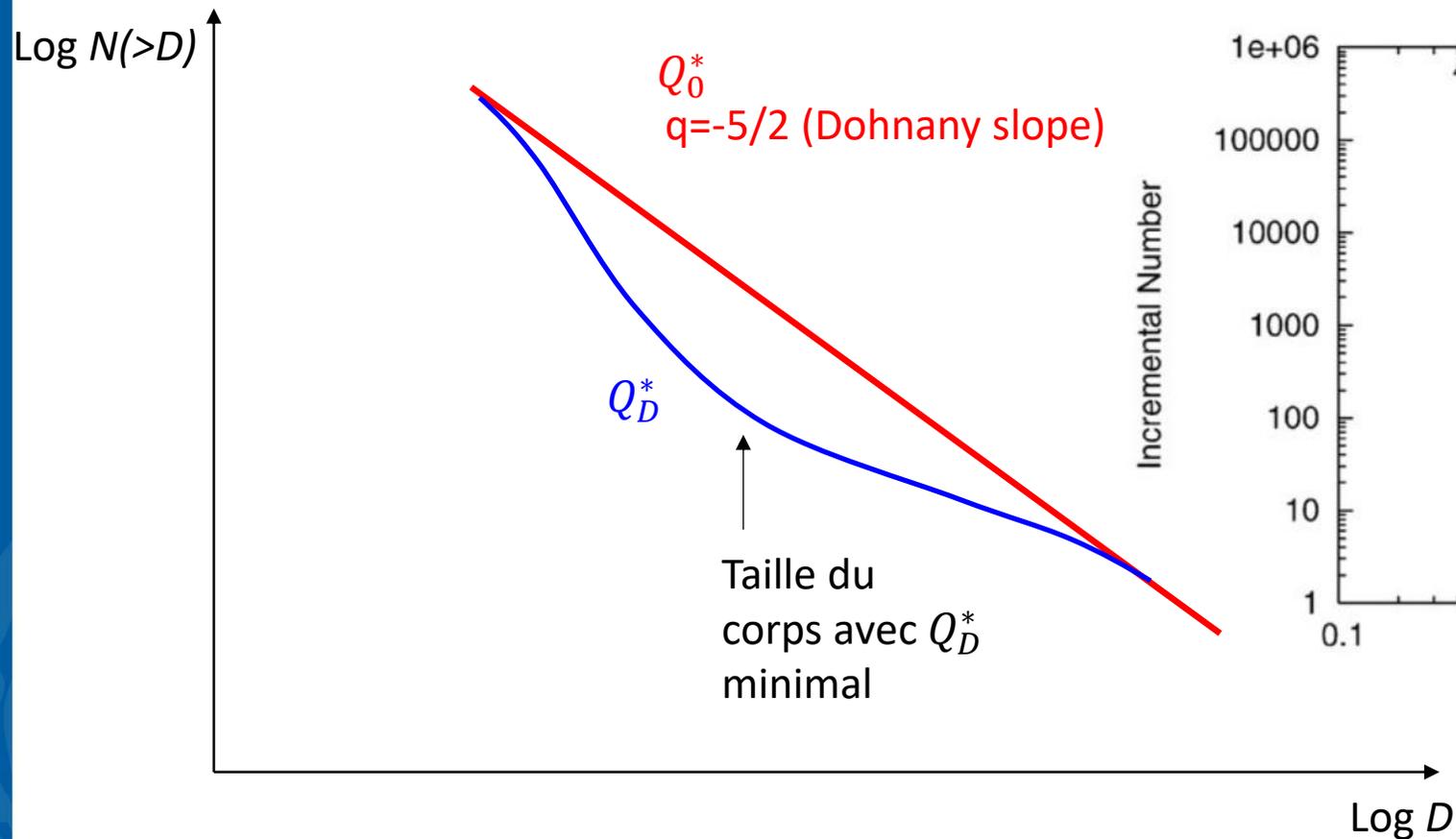
Leinhardt et Stewart, 2009

Si  $Q_D^* \sim D^s$  alors la distribution à l'équilibre collisionnelle est  $N(> D) \sim D^{-q}$  avec  $q = \frac{5+s/3}{2+s/3}$

O'Brien et Greenberg, 2003



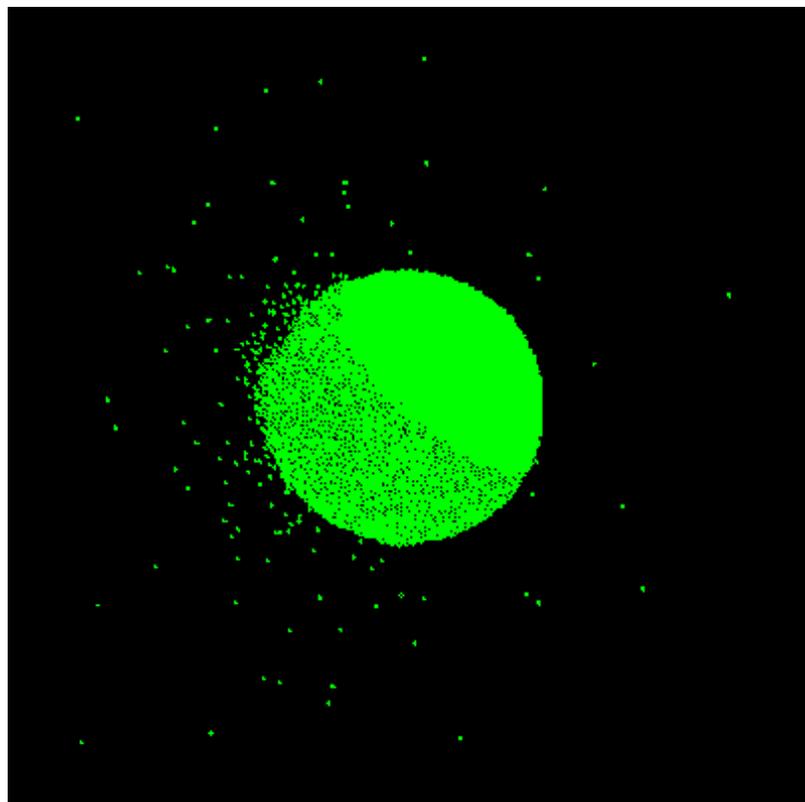
# Distribution des tailles à l'équilibre collisionnel





## Recette pour la modélisation de l'évolution collisionnelle

1. Une distribution de tailles initiale
2. Un modèle dynamique qui renseigne sur la fréquence des collisions et leurs vitesses, éventuellement en fonction du temps
3. Une fonction  $Q_D^*$
4. Une fonction qui décrit la distribution des fragments issus de chaque collision (selon  $Q/Q_D^*$ )

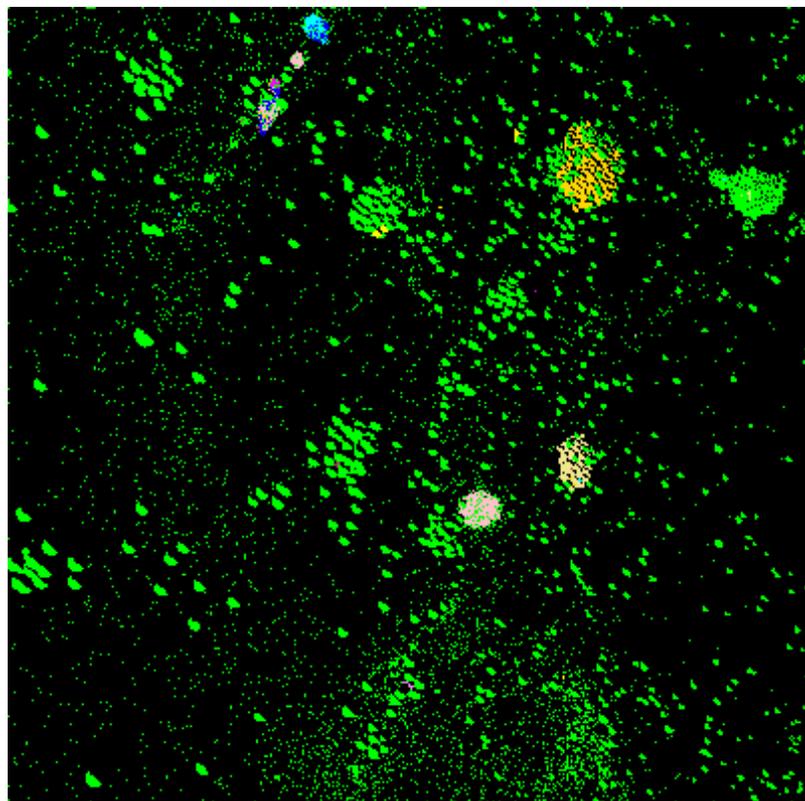


Michel and Richardson, 2013



## Recette pour la modélisation de l'évolution collisionnelle

1. Une distribution de tailles initiale
2. Un modèle dynamique qui renseigne sur la fréquence des collisions et leurs vitesses, éventuellement en fonction du temps
3. Une fonction  $Q_D^*$
4. Une fonction qui décrit la distribution des fragments issus de chaque collision (selon  $Q/Q_D^*$ )

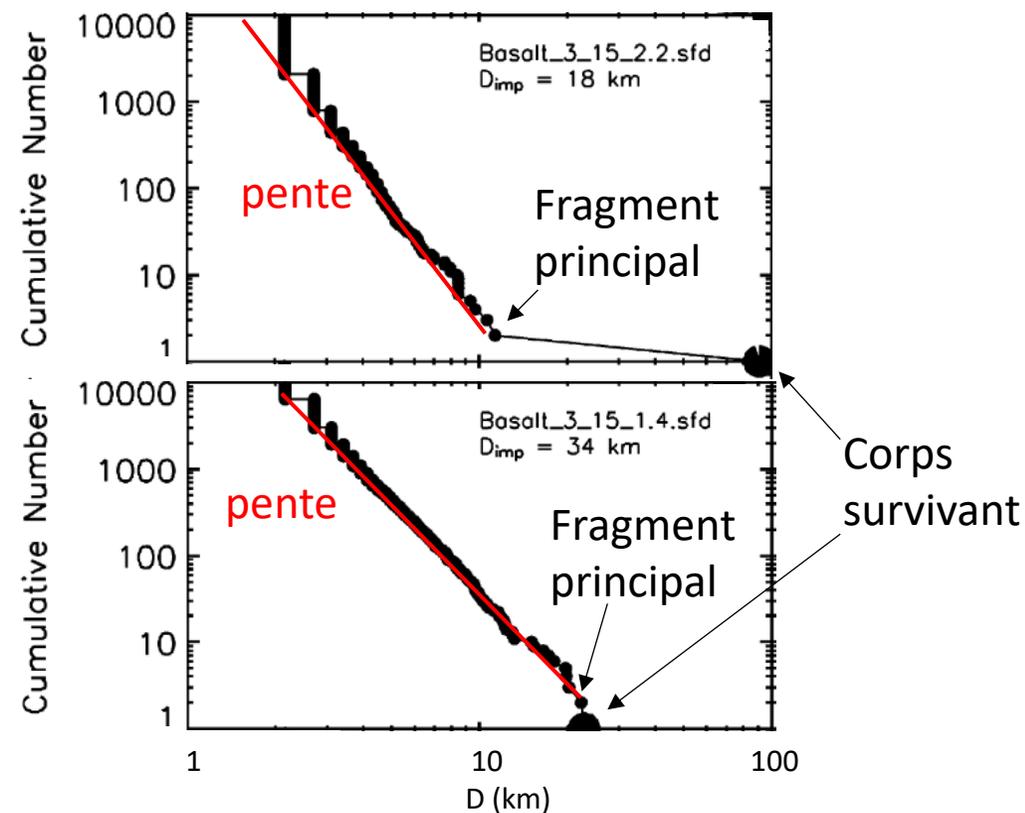


Michel and Richardson, 2013



## Recette pour la modélisation de l'évolution collisionnelle

1. Une distribution de tailles initiale
2. Un modèle dynamique qui renseigne sur la fréquence des collisions et leurs vitesses, éventuellement en fonction du temps
3. Une fonction  $Q_D^*$
4. Une fonction qui décrit la distribution des fragments issus de chaque collision (selon  $Q/Q_D^*$ )

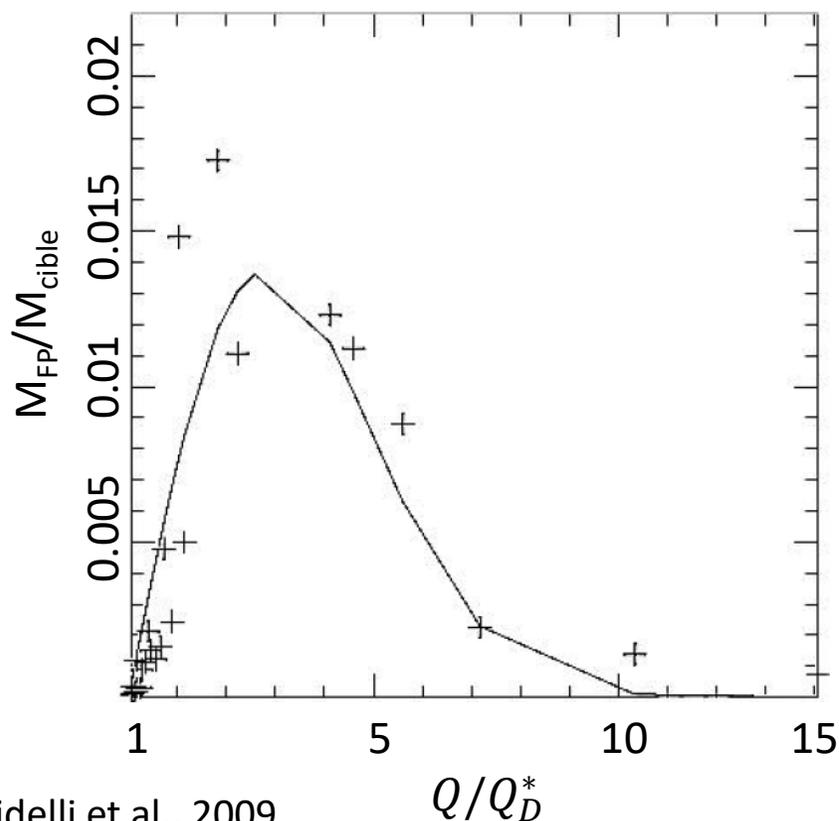


Durda et al., 2007

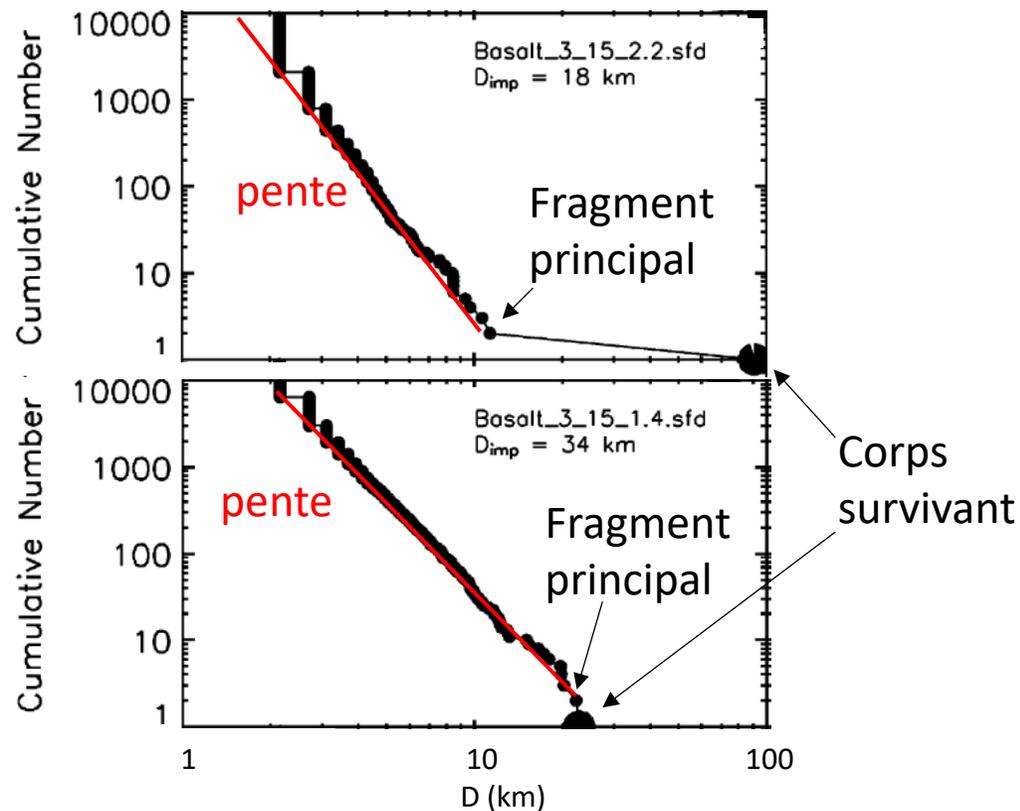


## Recette pour la modélisation de l'évolution collisionnelle

1. Une distribution de tailles initiale
2. Un modèle dynamique qui renseigne sur la fréquence des collisions et leurs vitesses, éventuellement en fonction du temps
3. Une fonction  $Q_D^*$
4. Une fonction qui décrit la distribution des fragments issus de chaque collision (selon  $Q/Q_D^*$ )



Morbidelli et al., 2009

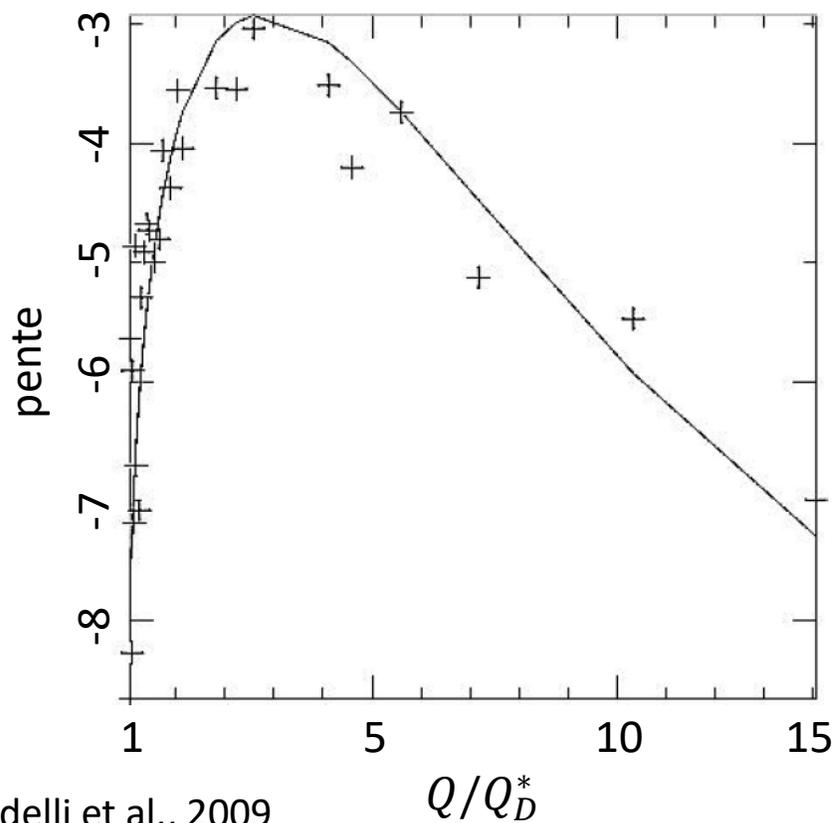


Durda et al., 2007

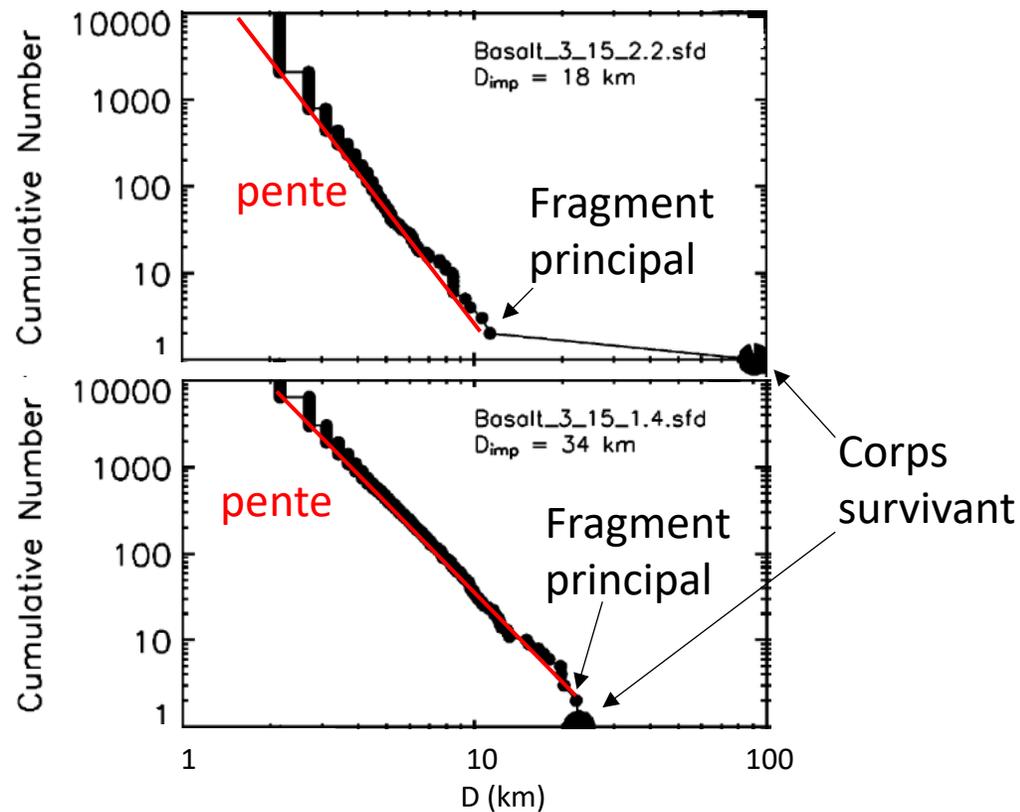


# Recette pour la modélisation de l'évolution collisionnelle

1. Une distribution de tailles initiale
2. Un modèle dynamique qui renseigne sur la fréquence des collisions et leurs vitesses, éventuellement en fonction du temps
3. Une fonction  $Q_D^*$
4. Une fonction qui décrit la distribution des fragments issus de chaque collision (selon  $Q/Q_D^*$ )



Morbidelli et al., 2009

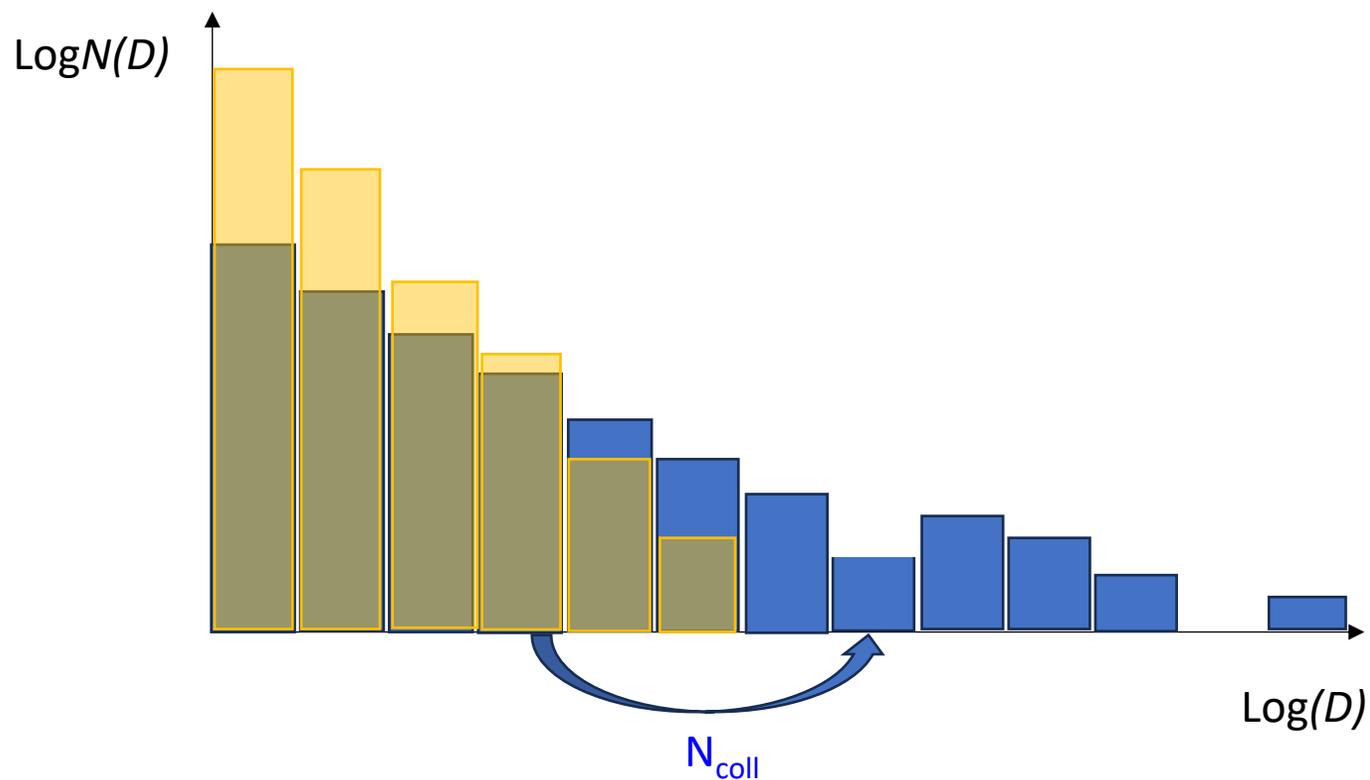


Durda et al., 2007



## Recette pour la modélisation de l'évolution collisionnelle

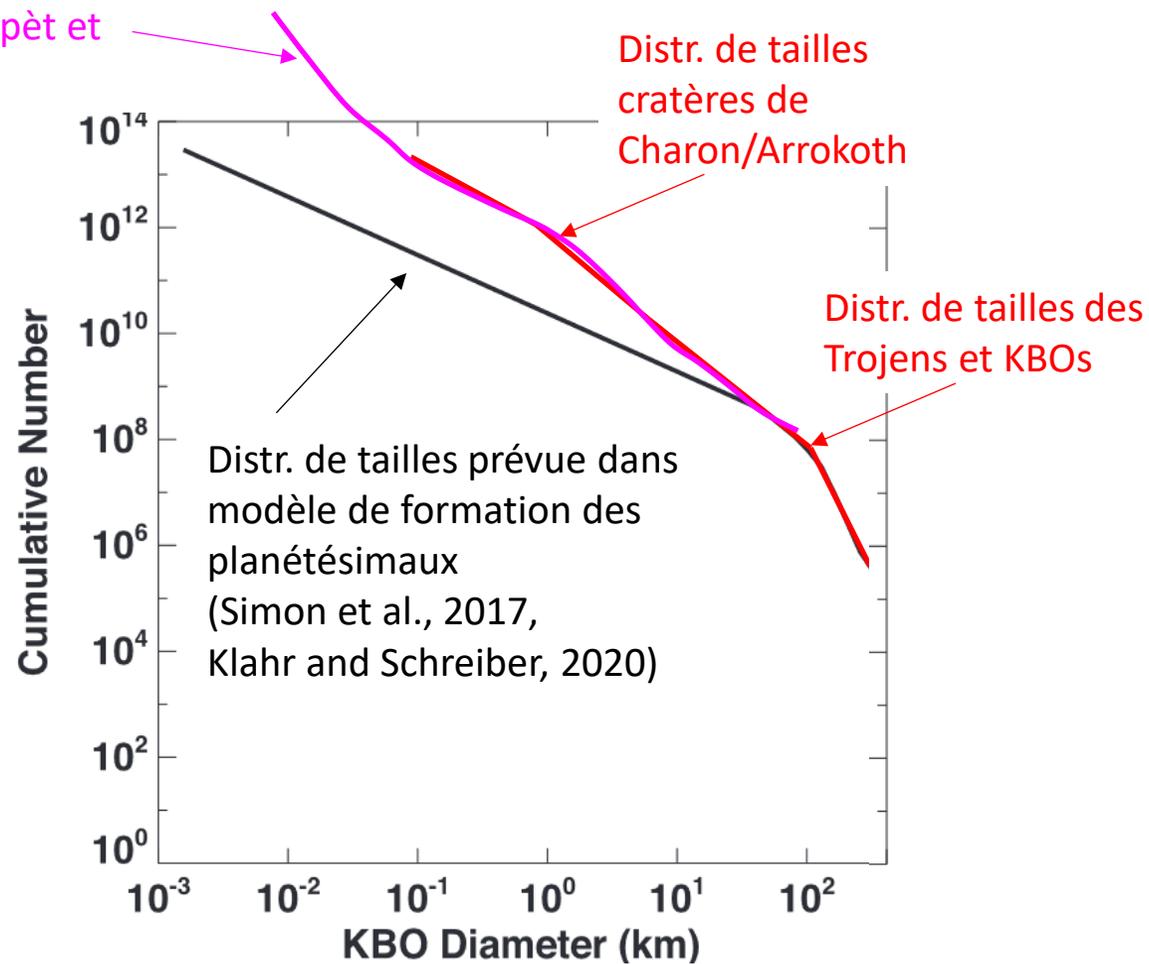
1. Une distribution de tailles initiale
2. Un modèle dynamique qui renseigne sur la fréquence des collisions et leurs vitesses, éventuellement en fonction du temps
3. Une fonction  $Q_D^*$
4. Une fonction qui décrit la distribution des fragments issus de chaque collision (selon  $Q/Q_D^*$ )





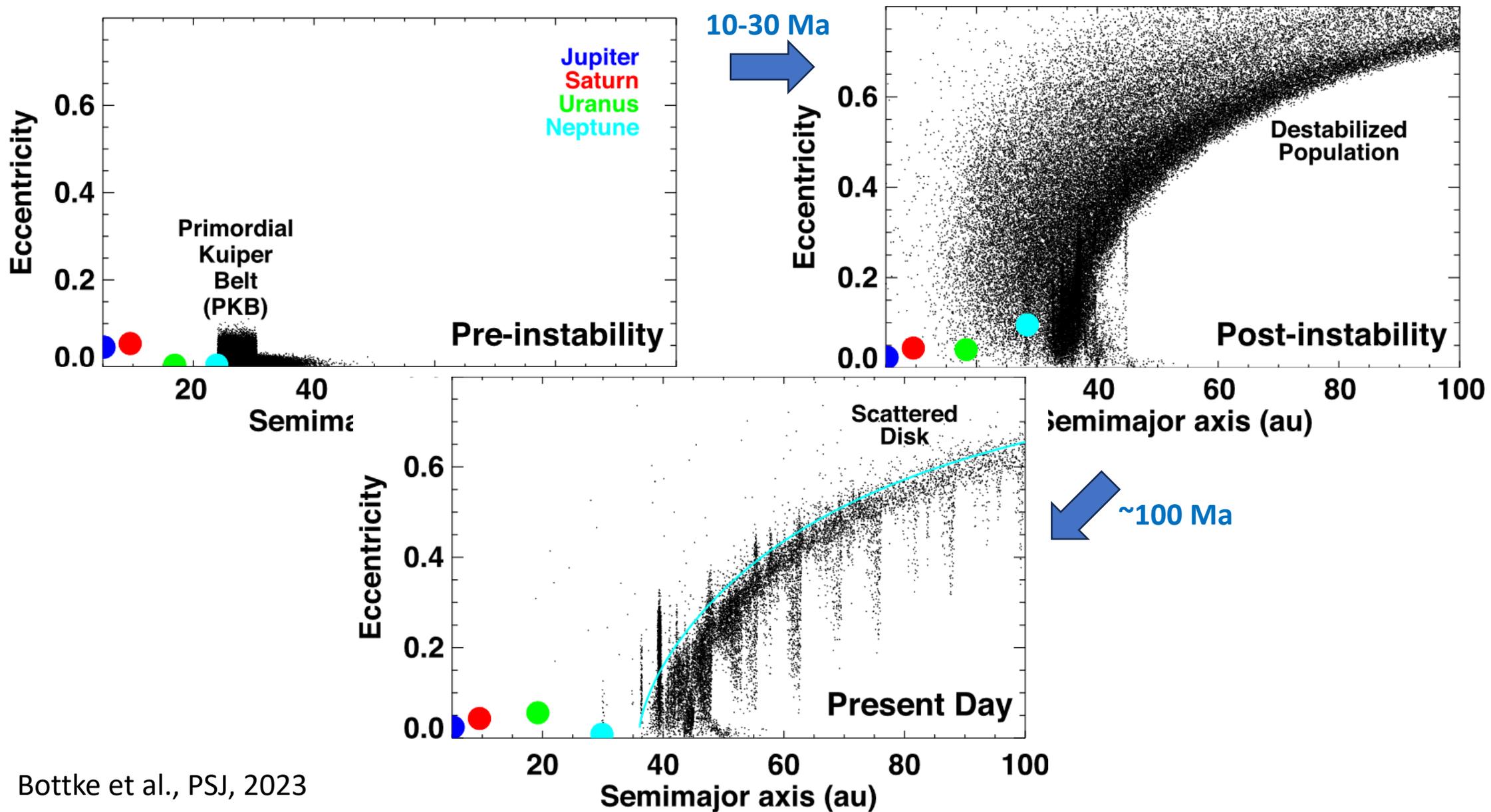
# Problème N. 1: réconcilier la distribution des tailles des TNOs avec celle issue de la formation des planétésimaux

Distr. de tailles cratères de Japèt et Phoébe





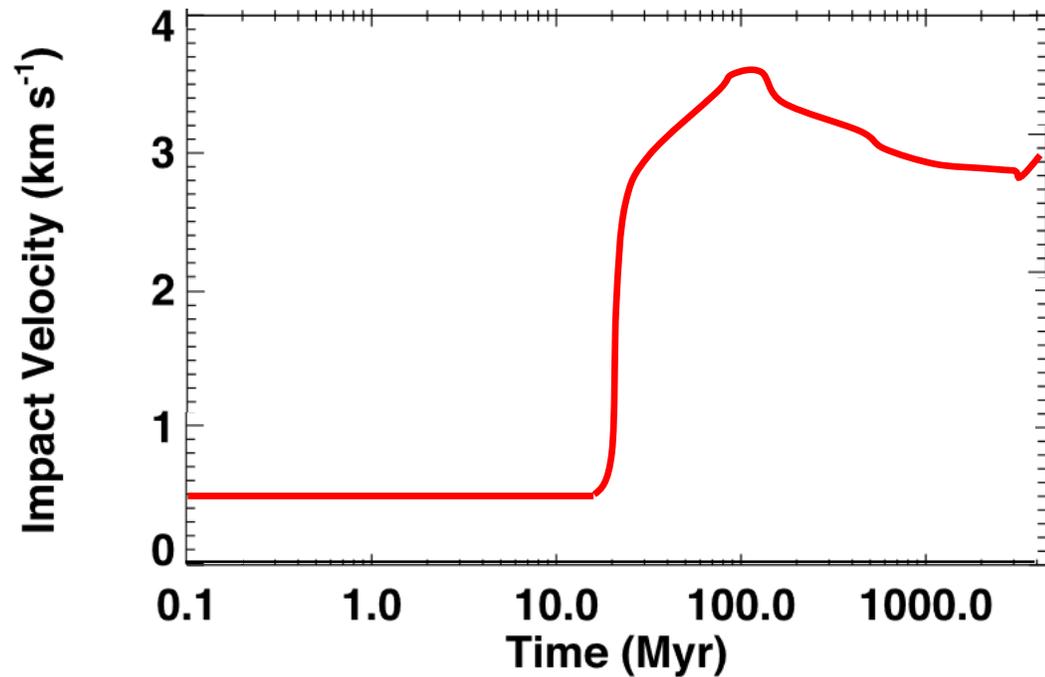
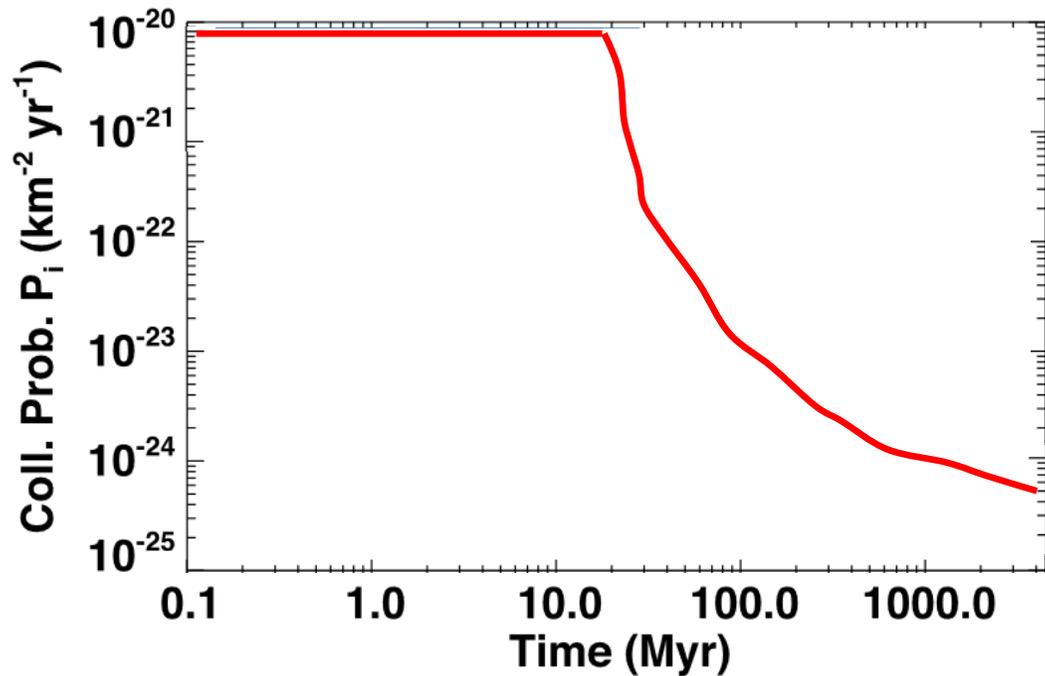
# Le modèle dynamique (modèle de Nice)



Bottke et al., PSJ, 2023

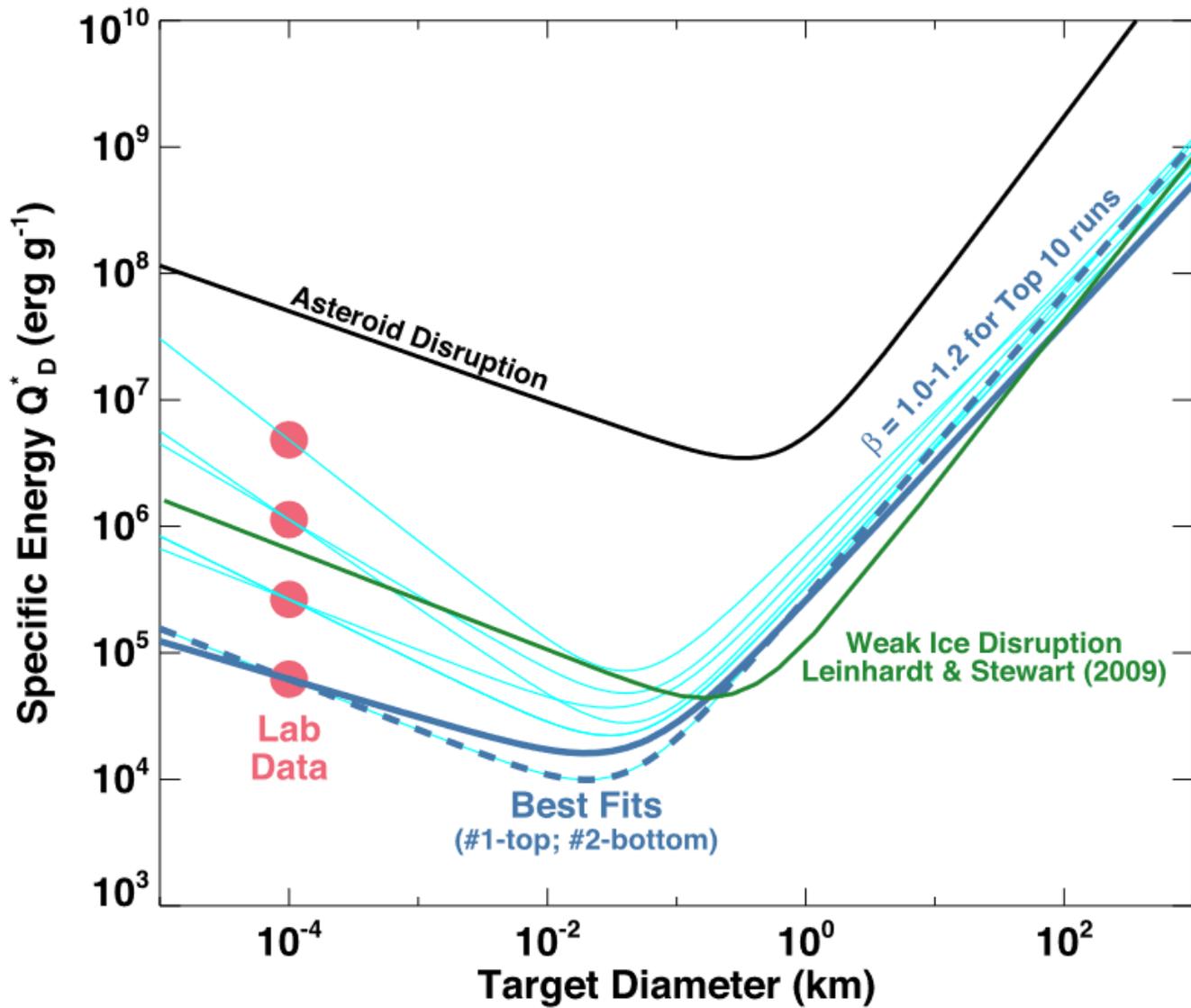


## Le modèle dynamique (modèle de Nice)



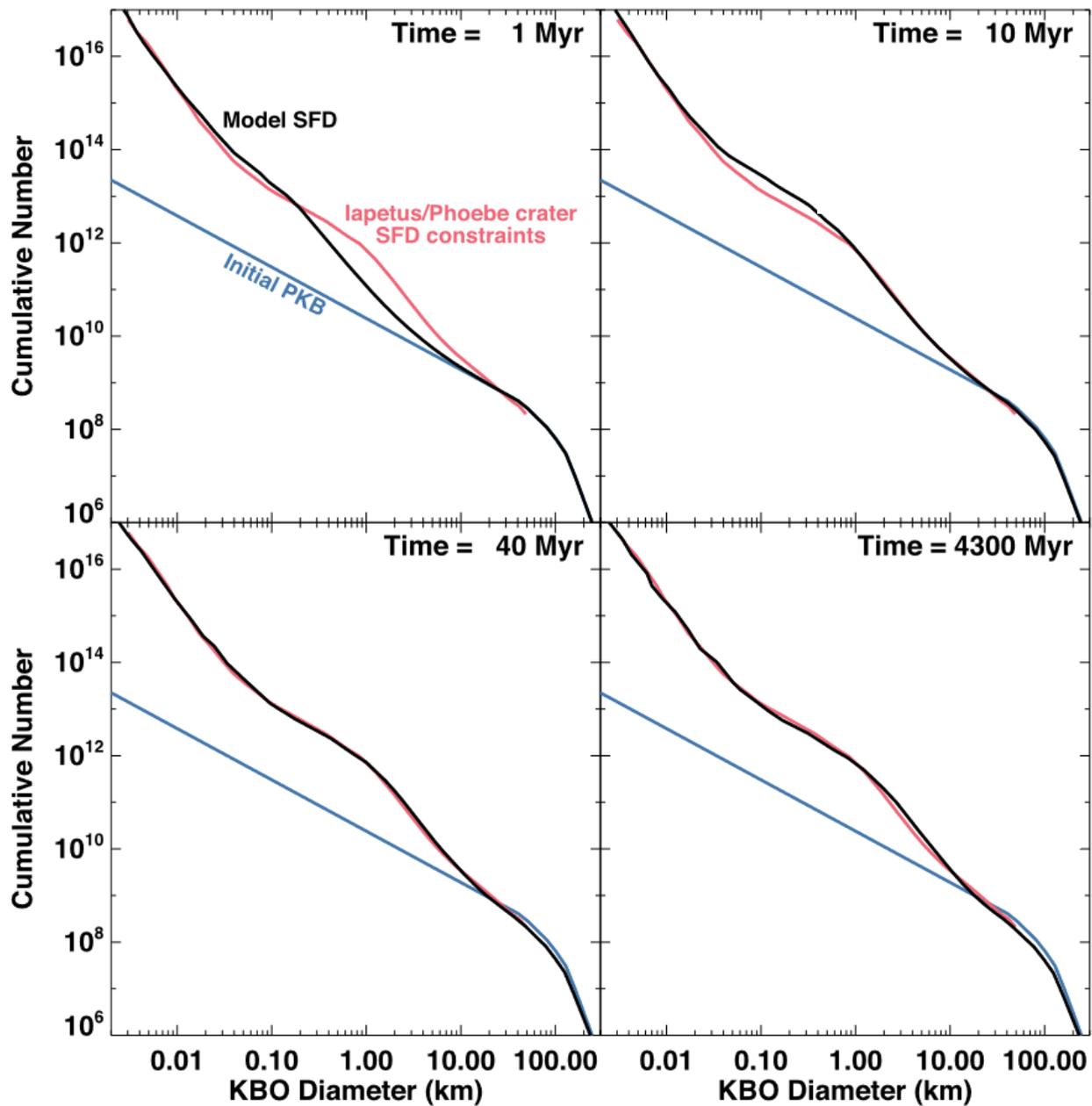


# Choix de $Q_D^*$





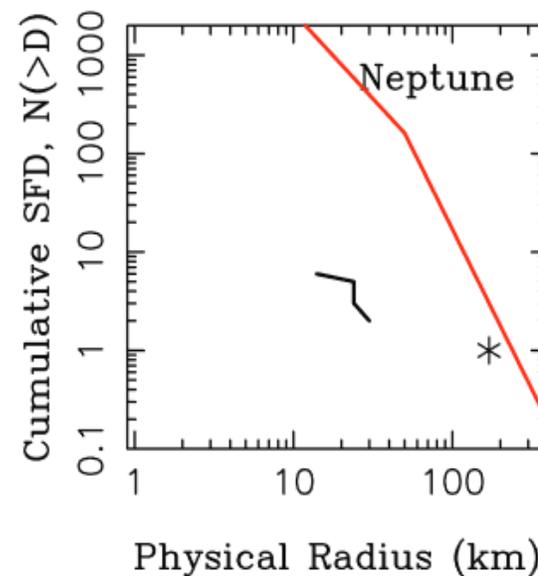
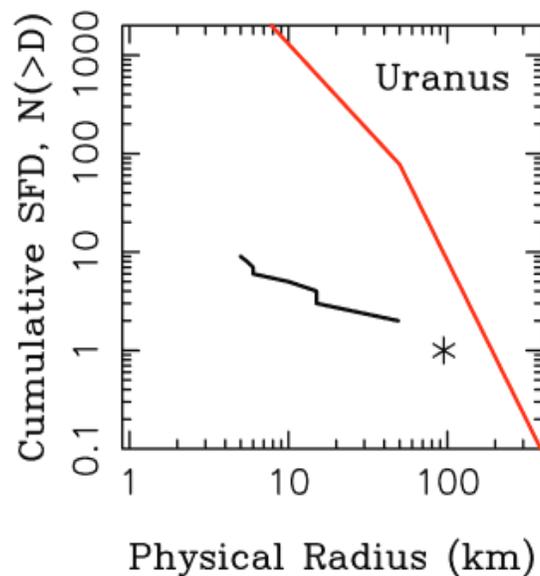
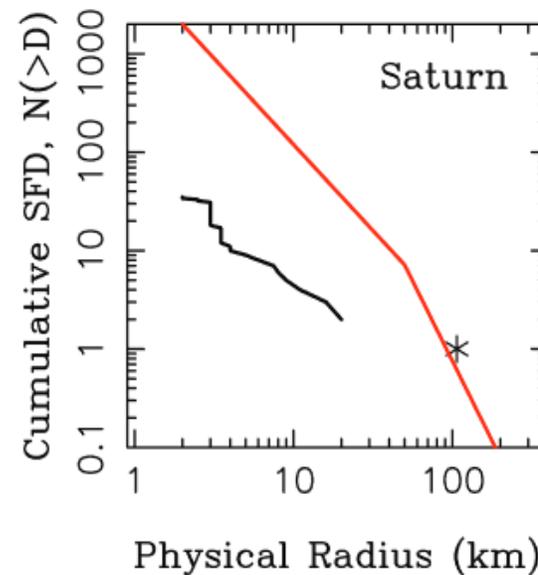
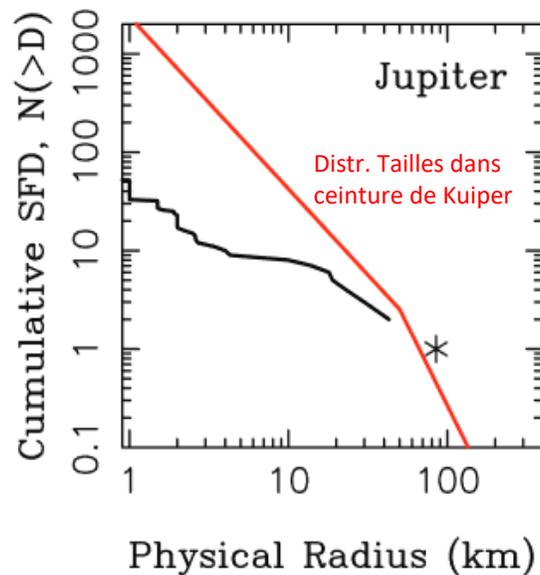
# Résultats



Bottke et al., PSJ, 2023

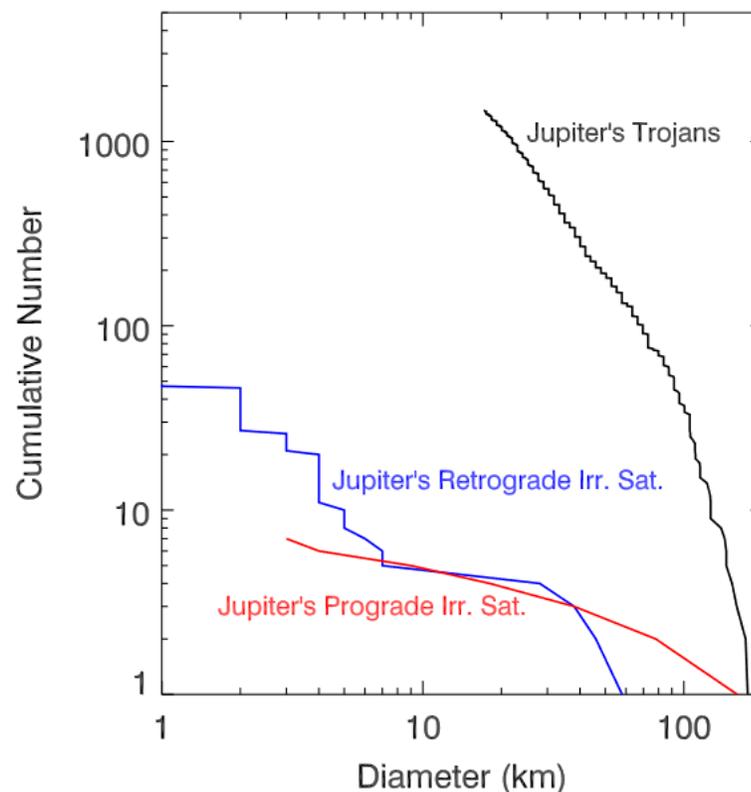
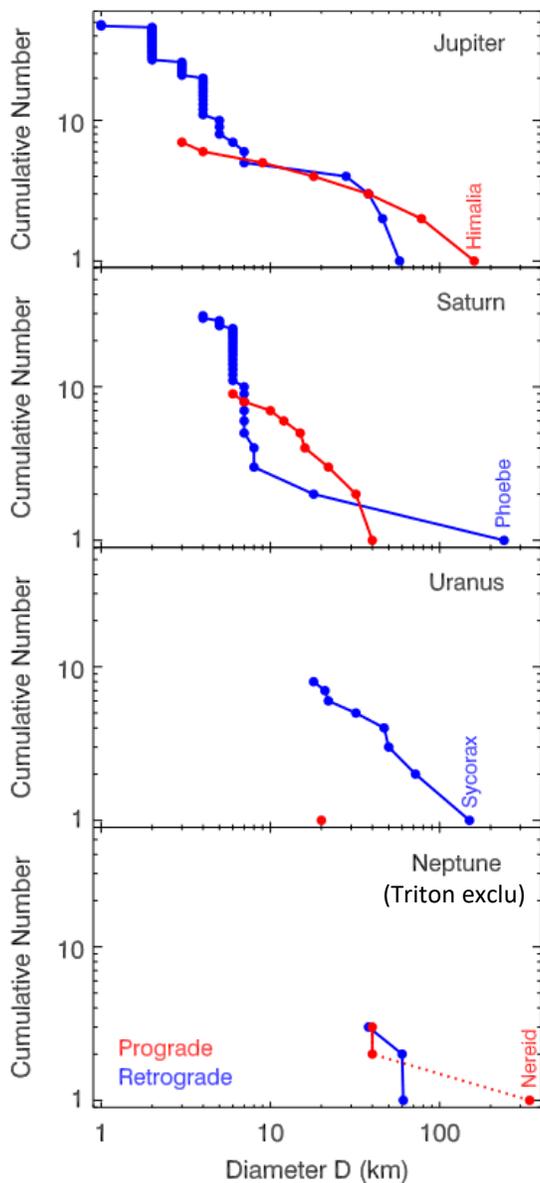


## Problème N. 2: réconcilier la distribution des satellites irréguliers avec celle des objets trans-Neptuniens





## Problème N. 2: réconcilier la distribution des satellites irréguliers avec celle des objets trans-Neptuniens





## Ingrédients du modèle

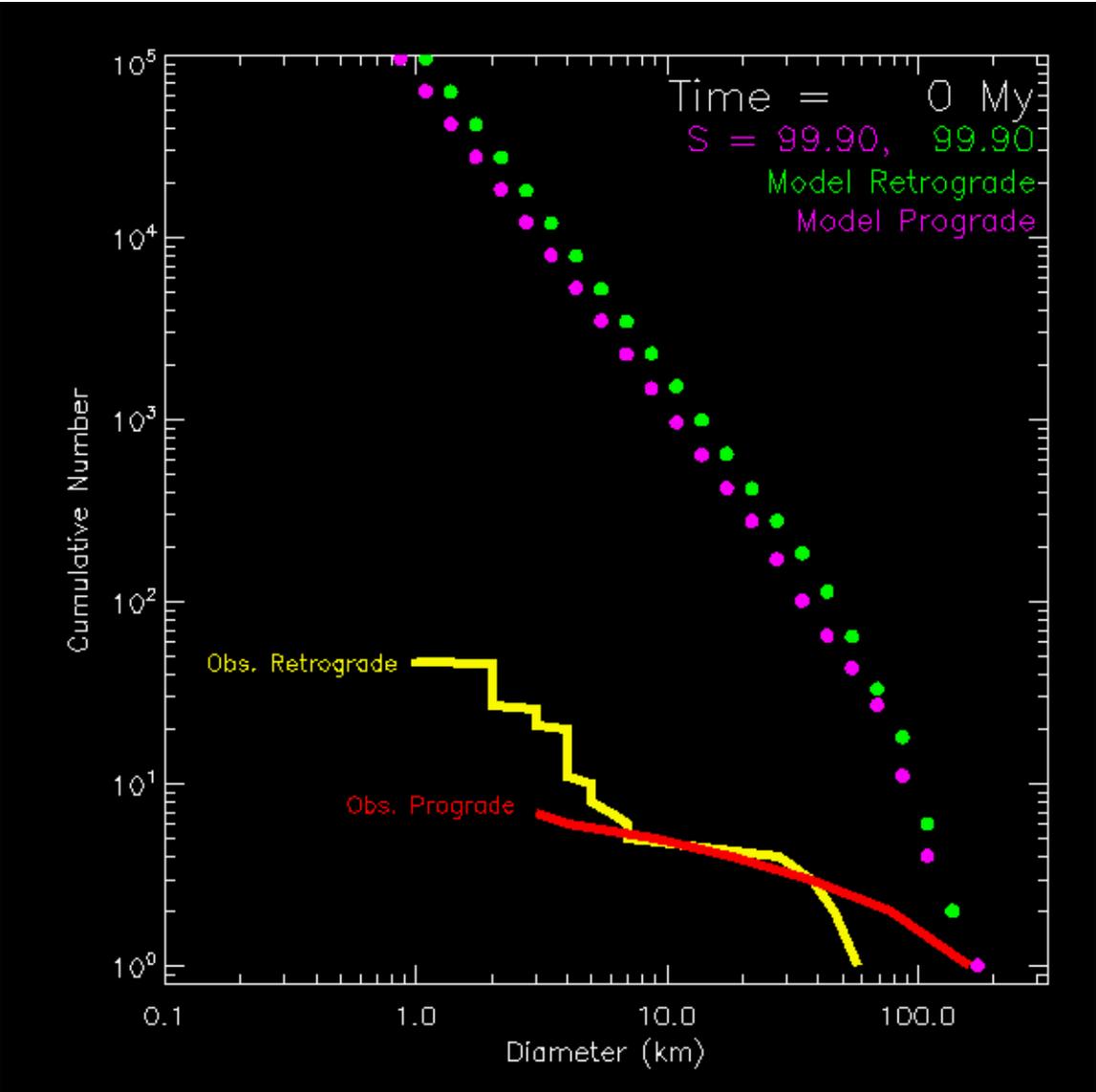
1. Une distribution des tailles comme celle des Troyens/KBOs, car les satellites irréguliers sont censés être capturés depuis la même source
2. Équipartition entre objets progrades et rétrogrades
3. Collisions à extrême haute vitesse



- Pulvérisation lors des collisions
- Très peu de fragments générés



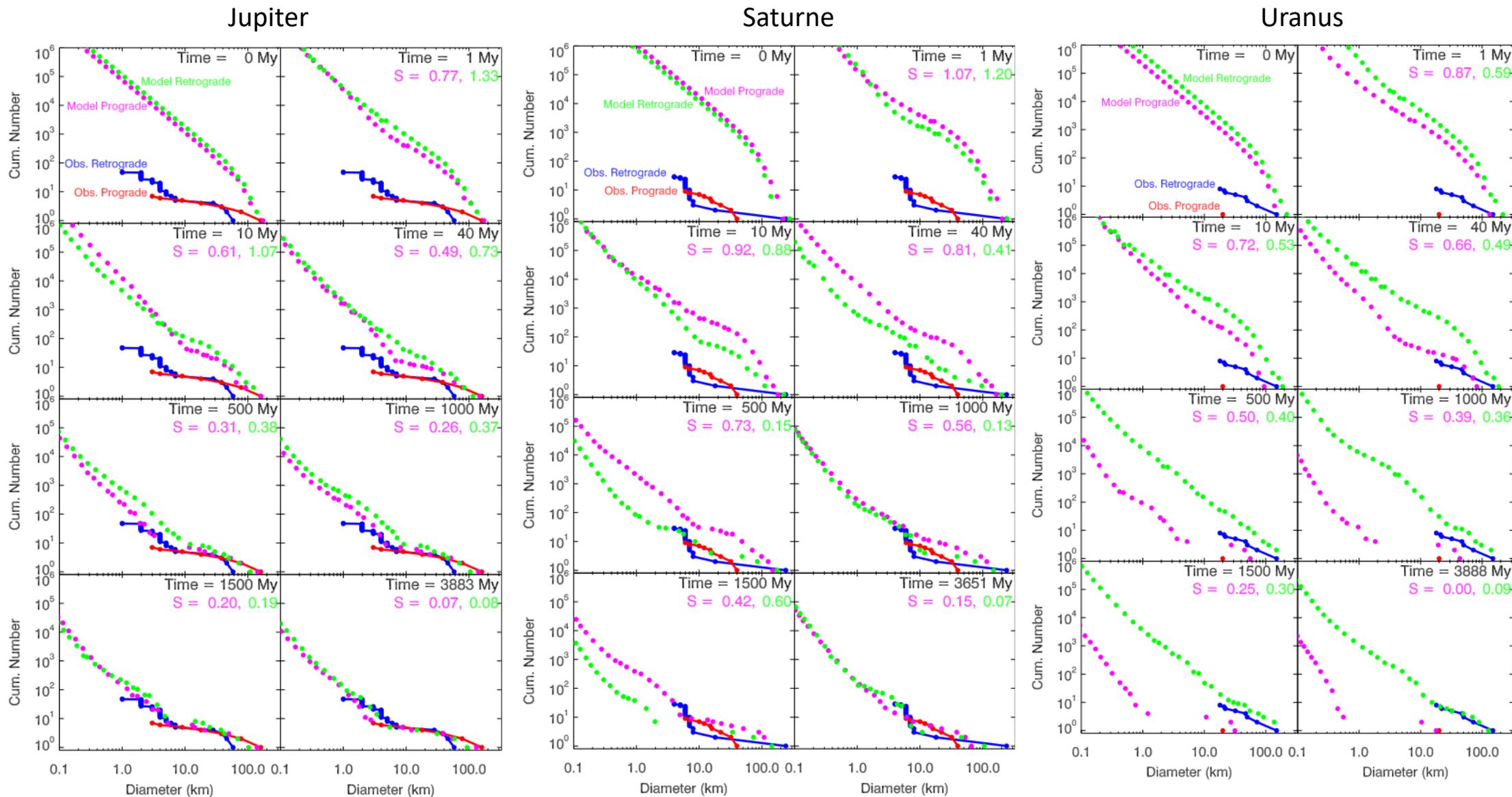
# Résultats



Bottke et al., AJ, 2010



# Résultats



Bottke et al., AJ, 2010



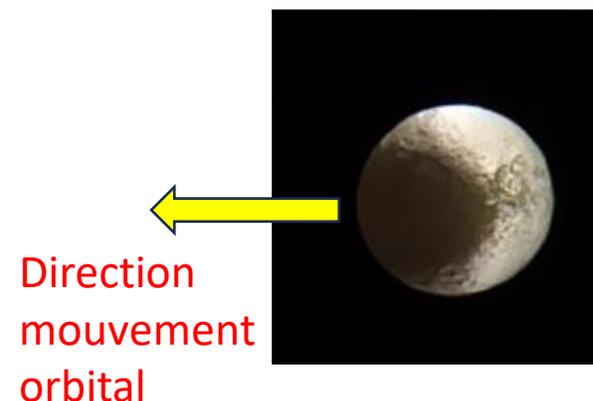
## Preuve de la génération d'une grande quantité de poussières?

Ce modèle prédit qu'une énorme quantité de poussières a été produite lors de la pulvérisation collisionnelles des satellites irréguliers fraîchement capturés

Cette production de poussières perdure aujourd'hui, mais avec beaucoup moins d'intensité (un ténu anneau de poussières est observé, associé à Phoebe)

Une preuve?

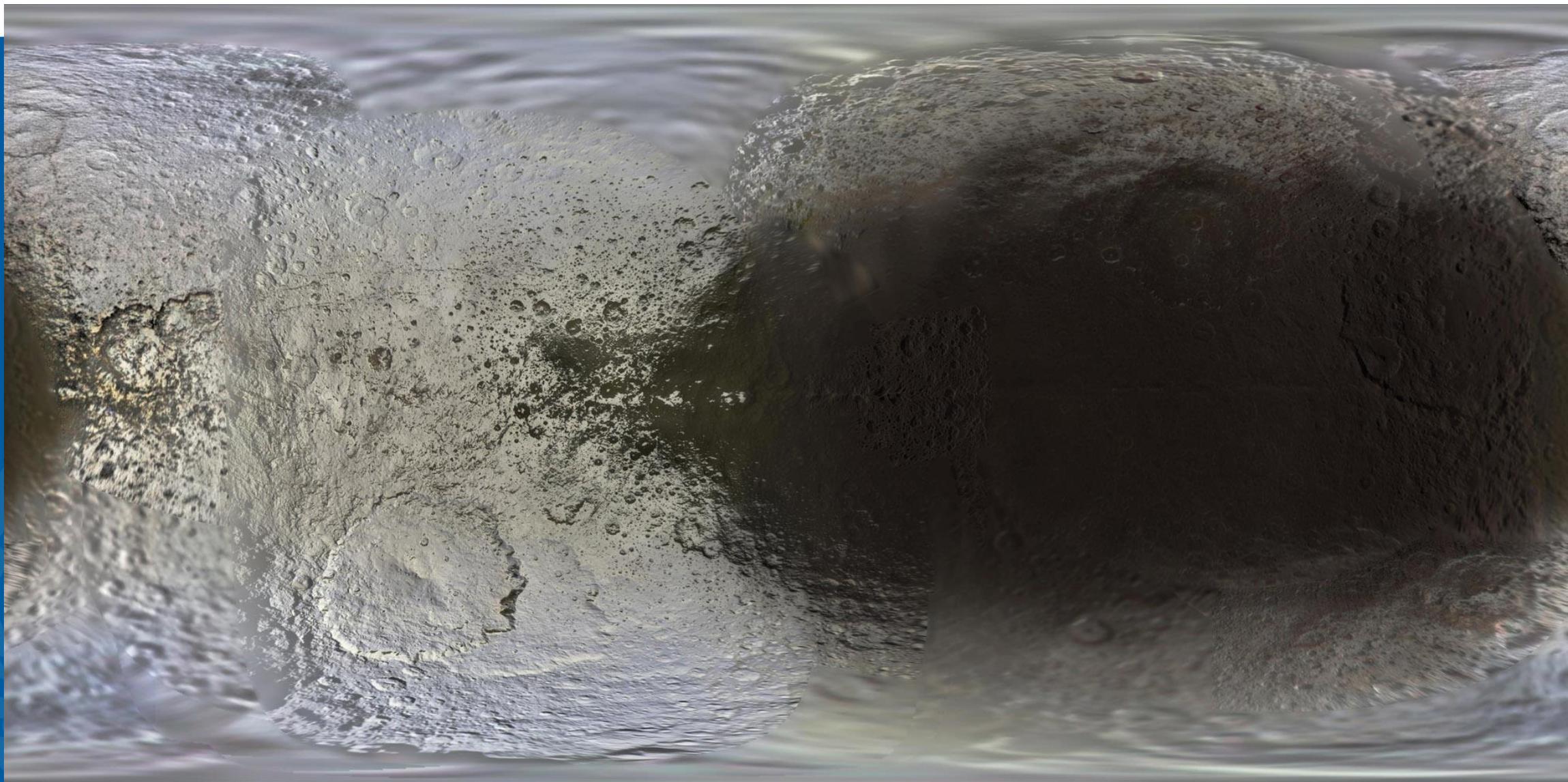
Le satellite Japet est le satellite régulier le plus loin de Saturne. Il a une curieuse dichotomie de couleurs, dans la direction de son mouvement autour de Saturn (rotation synchrone)



Cette anomalie pourrait s'être formée en se déplaçant dans le nuage de poussières générées par les collisions des satellites irréguliers



# Japet





## A retenir

- La capture des Troyens de Jupiter a eu lieu lors que ces deux planètes ont subitement changé de demi-grand axe lors de leur dernière rencontre proche avec une autre planète.
- Probablement le même pour les Troyens de Neptune, mais une capture dans une migration lente résiduelle est aussi possible
- Ceci explique la distribution des tailles des Troyens, identique à celle des KBOs, et leur distribution orbitale, en particulier concernant les inclinaisons
- La capture des satellites irréguliers pourrait avoir eu lieu lors des rencontres entre planètes
- Ceci explique la distribution orbitale de ces satellites, mais il y a une tension quant à la probabilité de capture. Possible rôle du gaz circumplanétaire pour faciliter la capture?
- **La capture des Troyens, des satellites irréguliers et la formation du Kernel de la population froide de la ceinture de Kuiper sont trois preuves qu'une instabilité dynamique des planètes géantes a bien eu lieu**
- L'évolution collisionnelle permet de réconcilier la distribution des tailles des KBOs actuels avec celle des planétésimaux initiaux, formés par effondrement gravitationnel de poussières primitives
- Elle permet aussi d'expliquer pourquoi il y a si peu de petits satellites irréguliers par rapport aux gros (distribution de tailles plate).

**Joyeux Noël à tous !**