



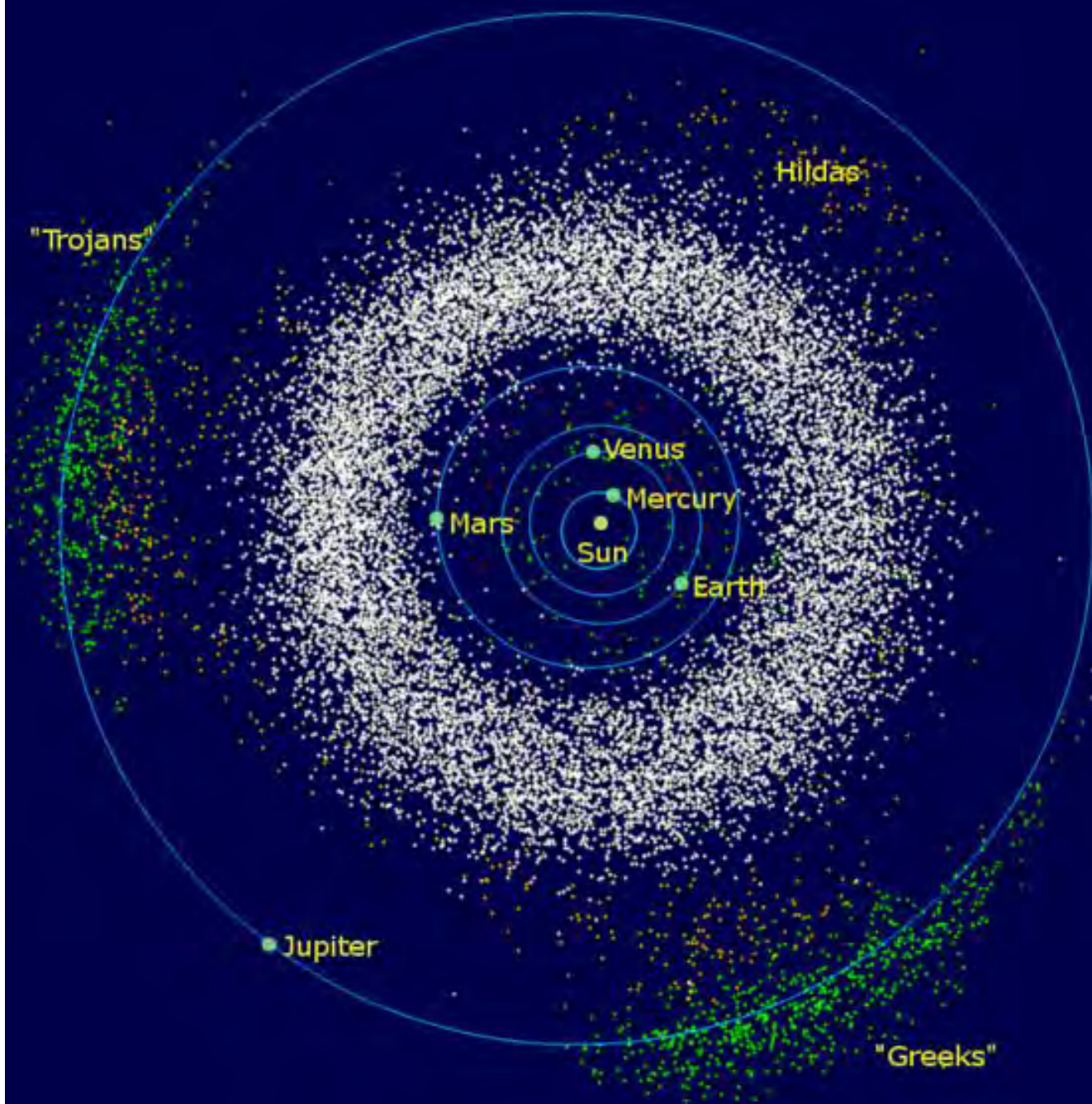
Leçon N. 1 - 22 Octobre 2025

Alessandro  
**MORBIDELLI**

Chaire

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

*La ceinture des astéroïdes*



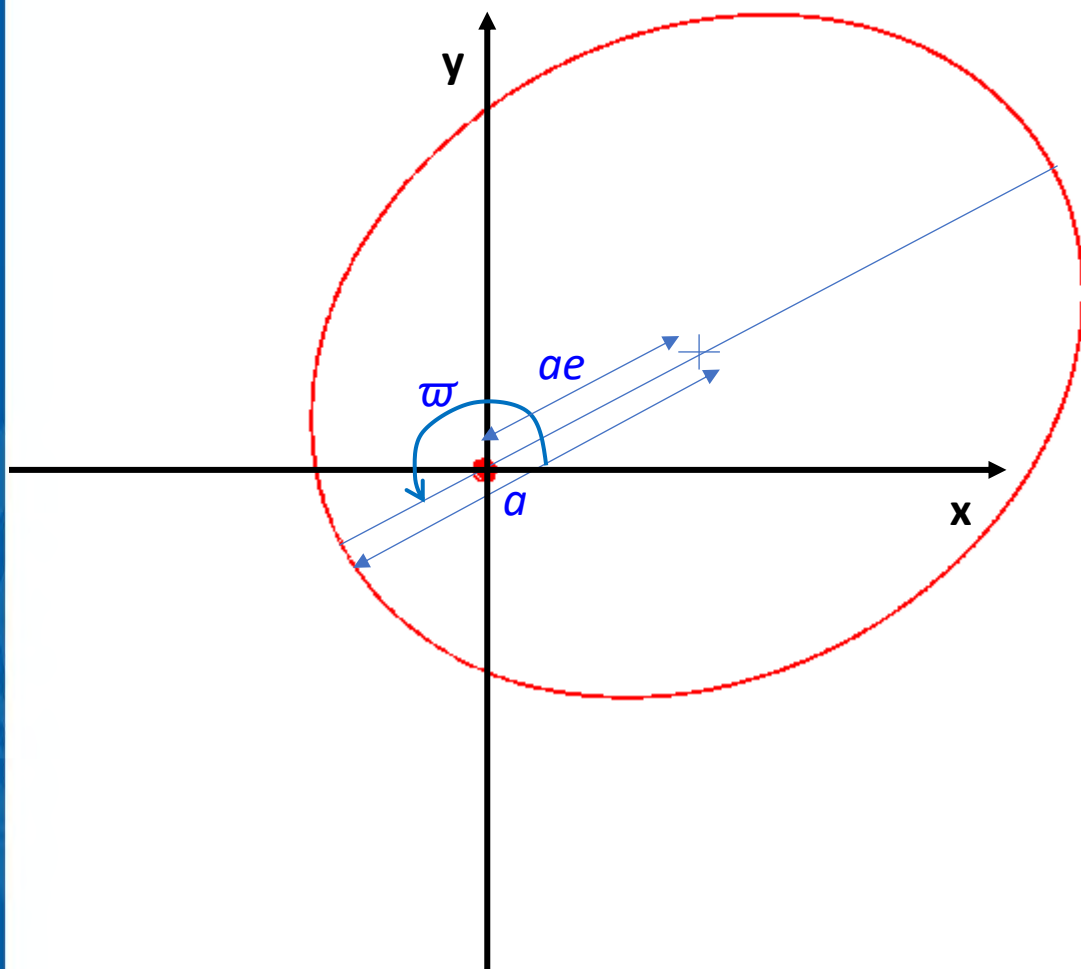


# Les éléments orbitaux

$a$ : demi grand axe

$e$ : excentricité

$\varpi$ : longitude du périhélie



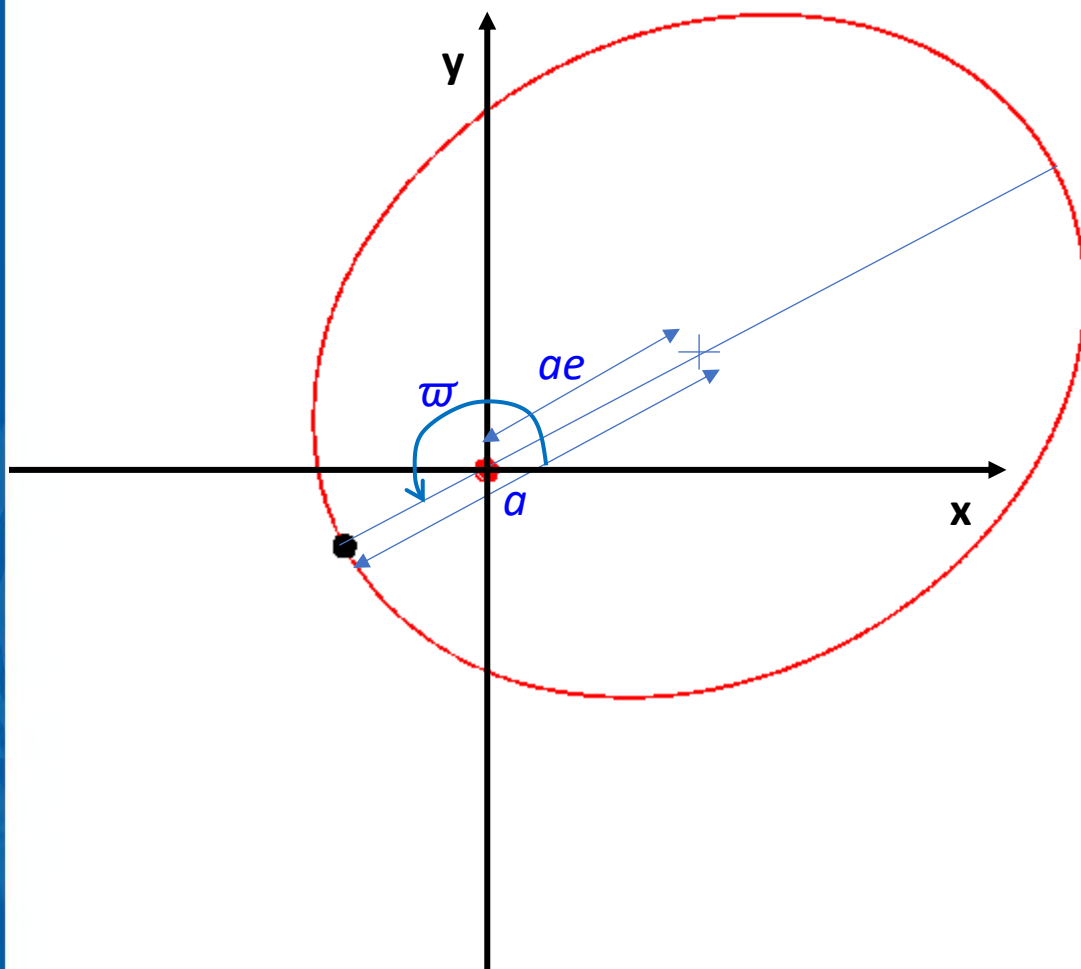


# Les éléments orbitaux

$a$ : demi grand axe

$e$ : excentricité

$\varpi$ : longitude du périhélie



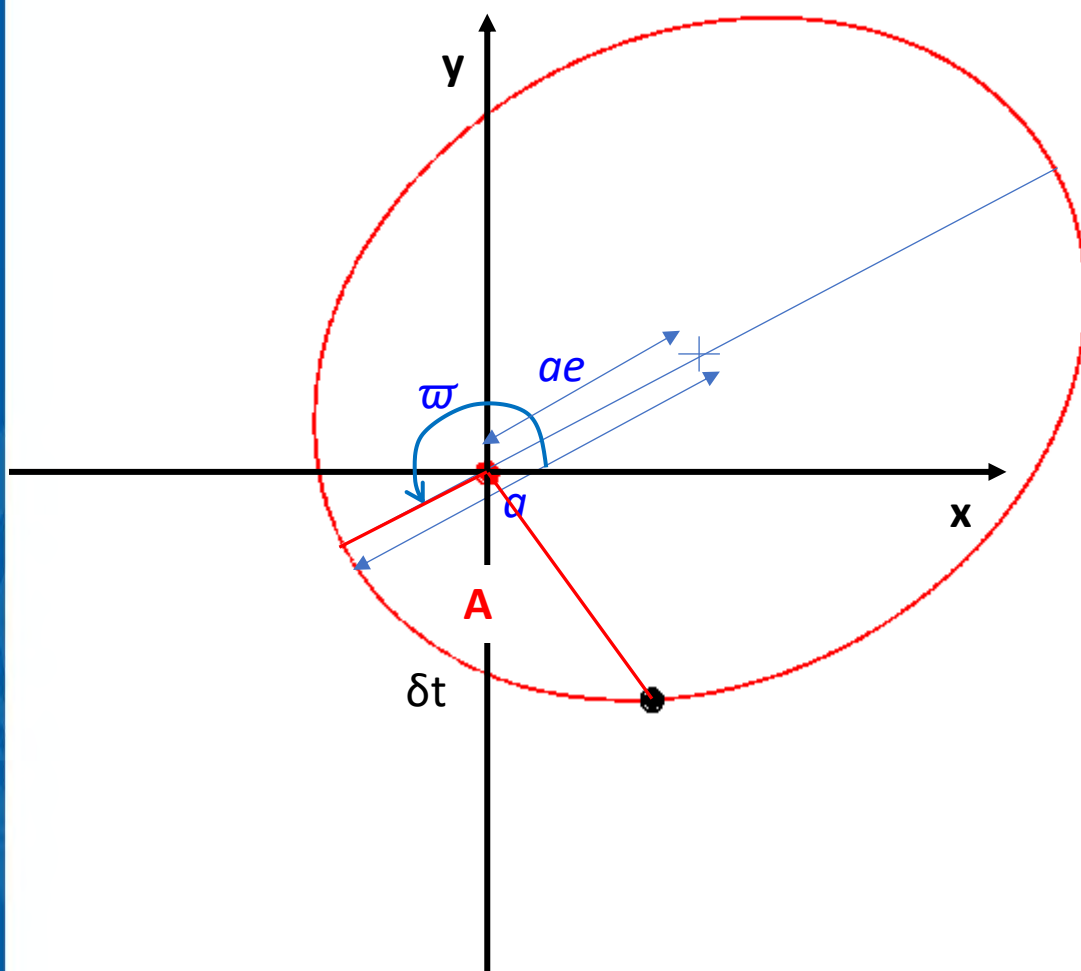


# Les éléments orbitaux

$a$ : demi grand axe

$e$ : excentricité

$\varpi$ : longitude du périhélie







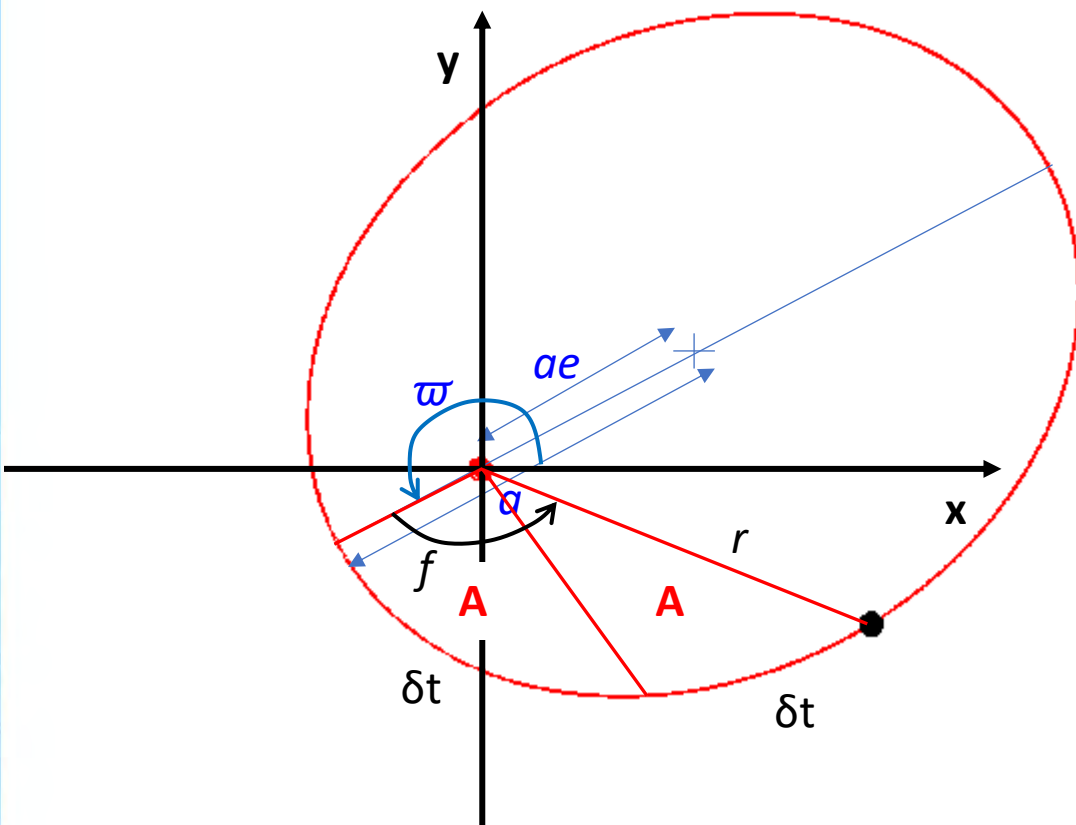
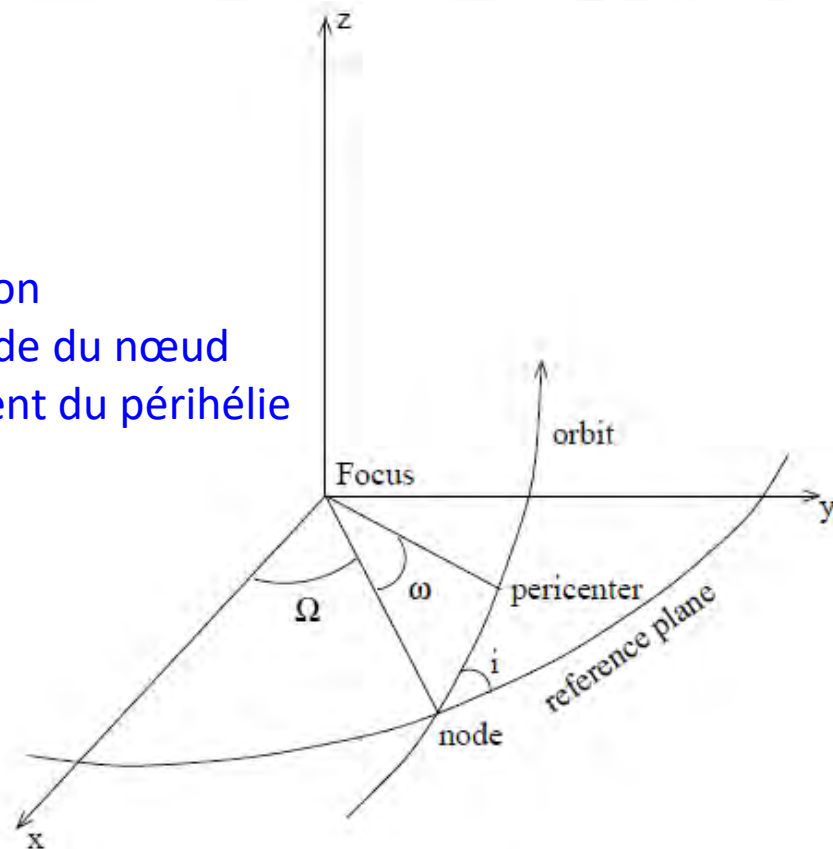
## Les éléments orbitaux

$\varpi$ : longitude du périhélie

$M = 2\pi A(t)/A_{\text{tot}}$ : anomalie moyenne

$$E - e \sin E = M$$

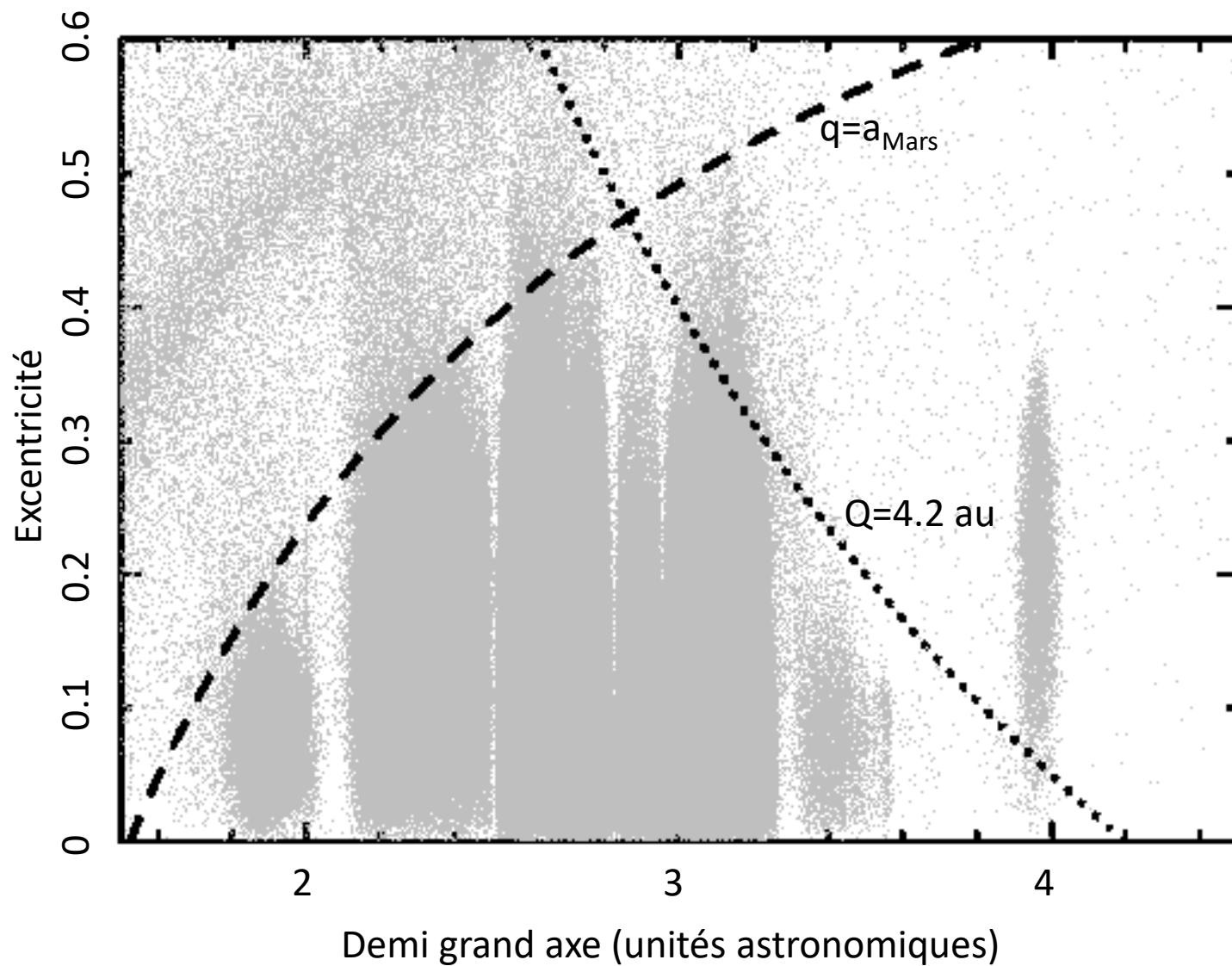
$$r = a(1 - e \cos E) \ , \quad \cos f = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}$$


$$\varpi = \Omega + \omega$$


## La période orbitale dépend uniquement du demi grand axe



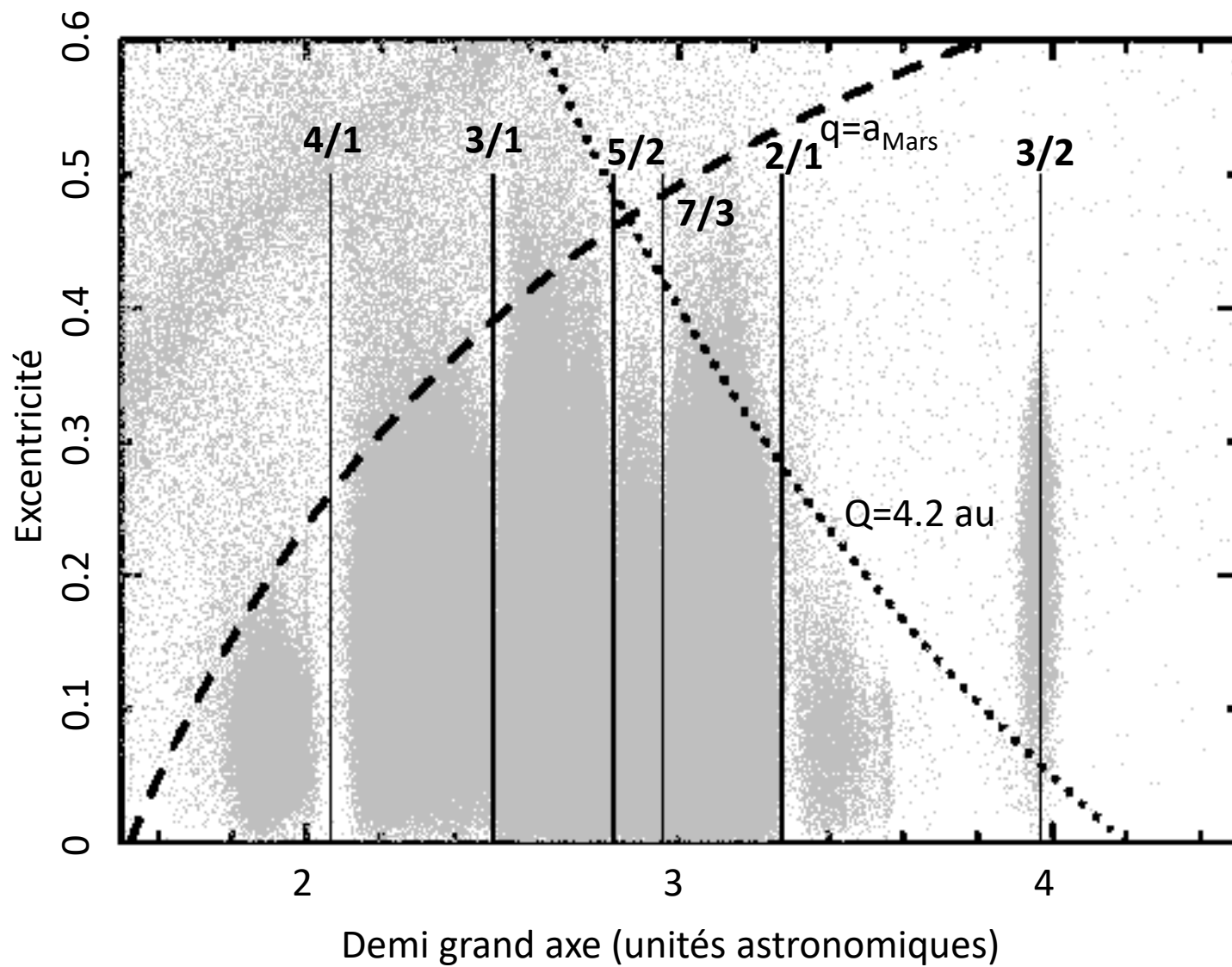
## La structure de la ceinture en éléments orbitaux



$$q = a(1 - e)$$
$$Q = a(1 + e)$$



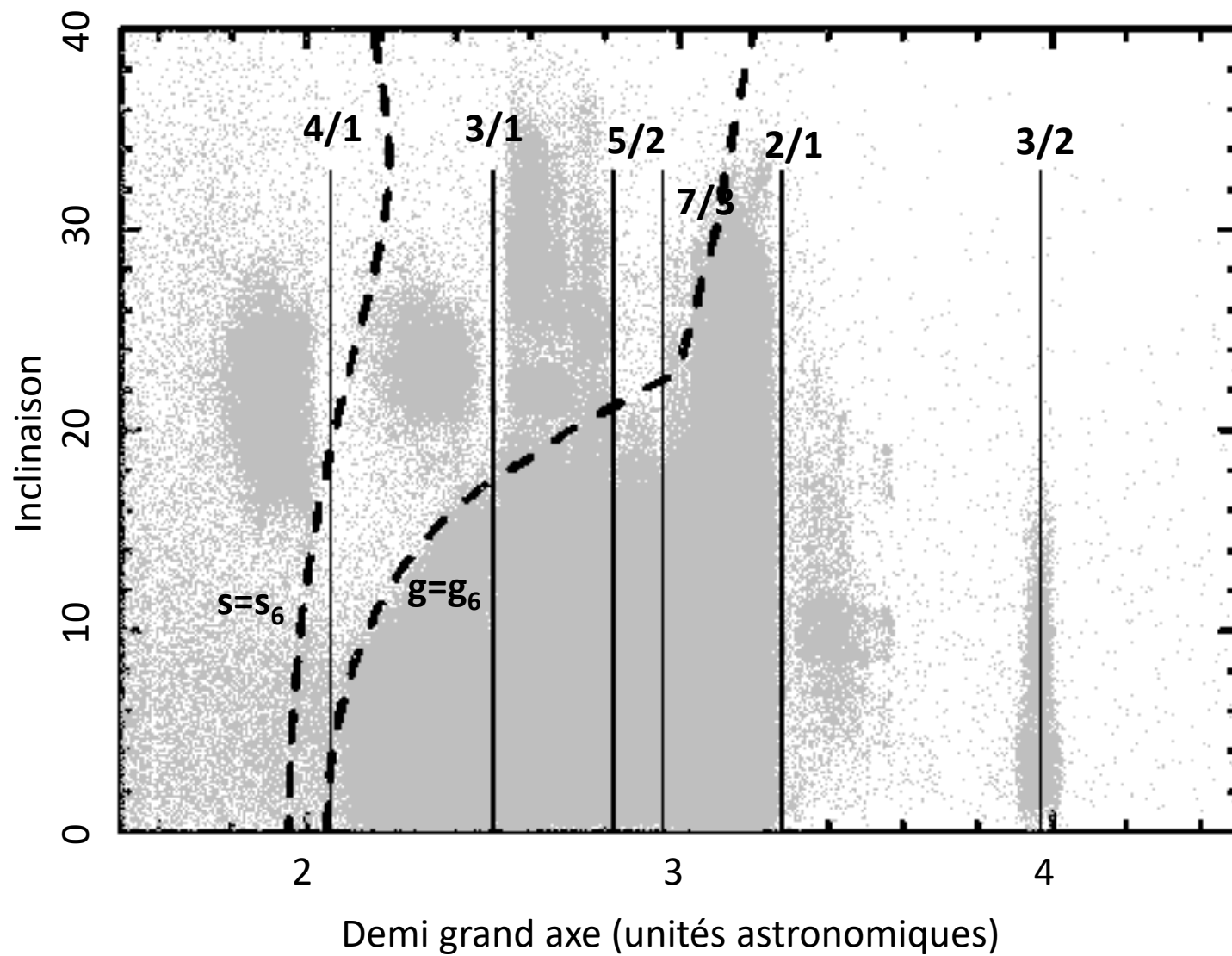
## Lacunes de Kirkwood







## Résonances séculaires

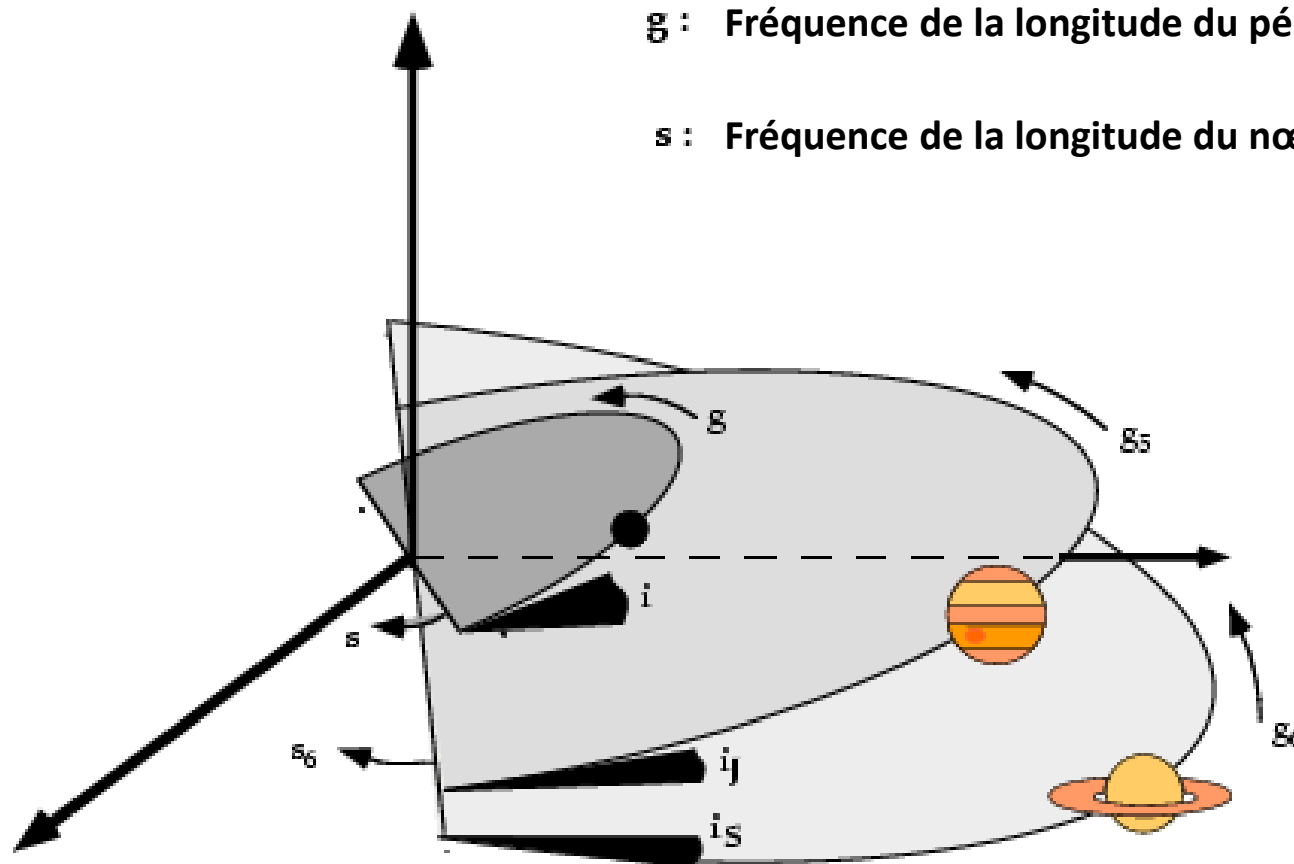




## Précession orbitale

$g$  : Fréquence de la longitude du périhélie

$s$  : Fréquence de la longitude du nœud



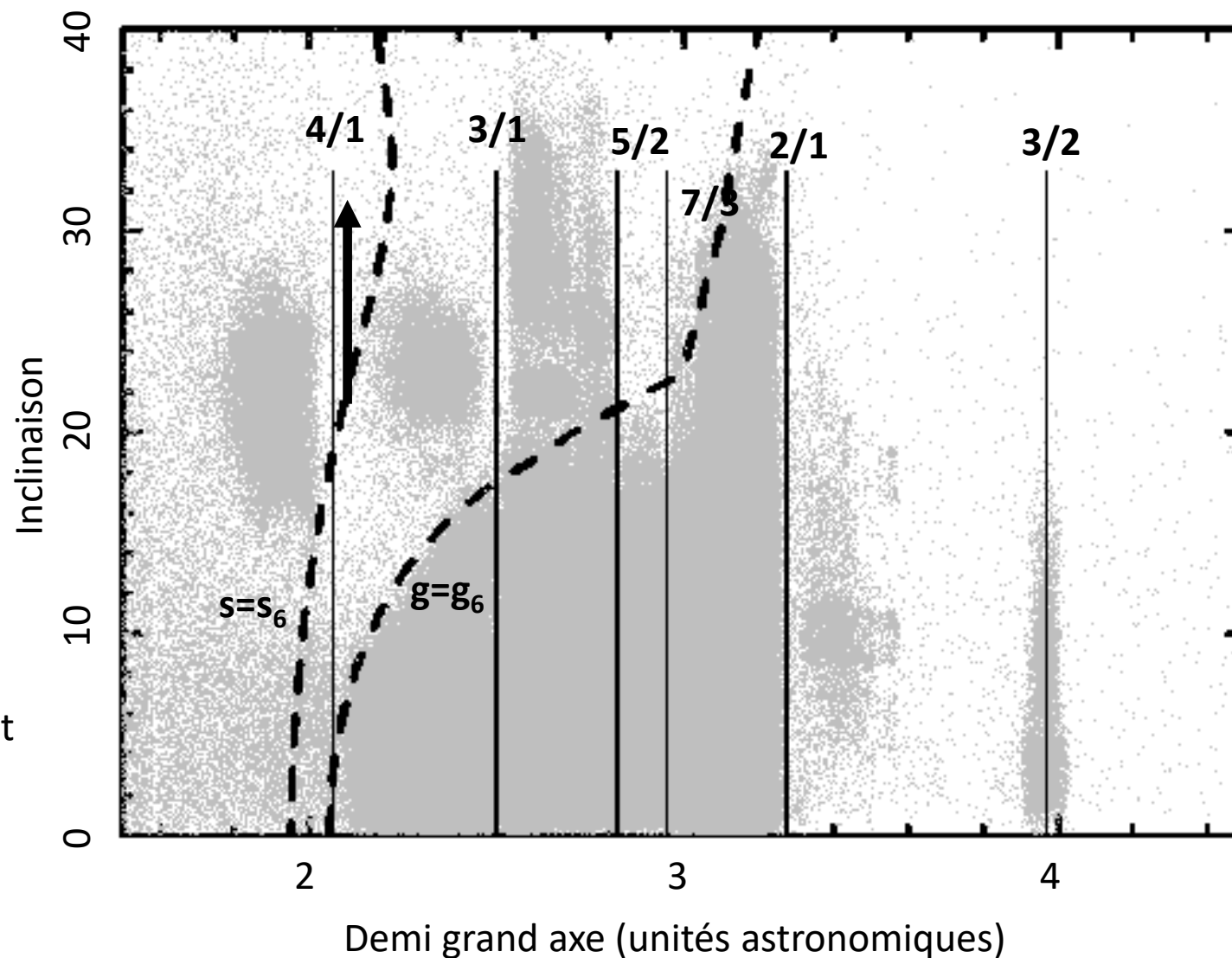


## Résonances séculaires et bord interne de la ceinture des astéroïdes

Résonance  $g = g_6$ :  
excite l'excentricité de  
l'orbite de l'astéroïde  
en le forçant à devenir  
croiseur de Mars ou de  
la Terre

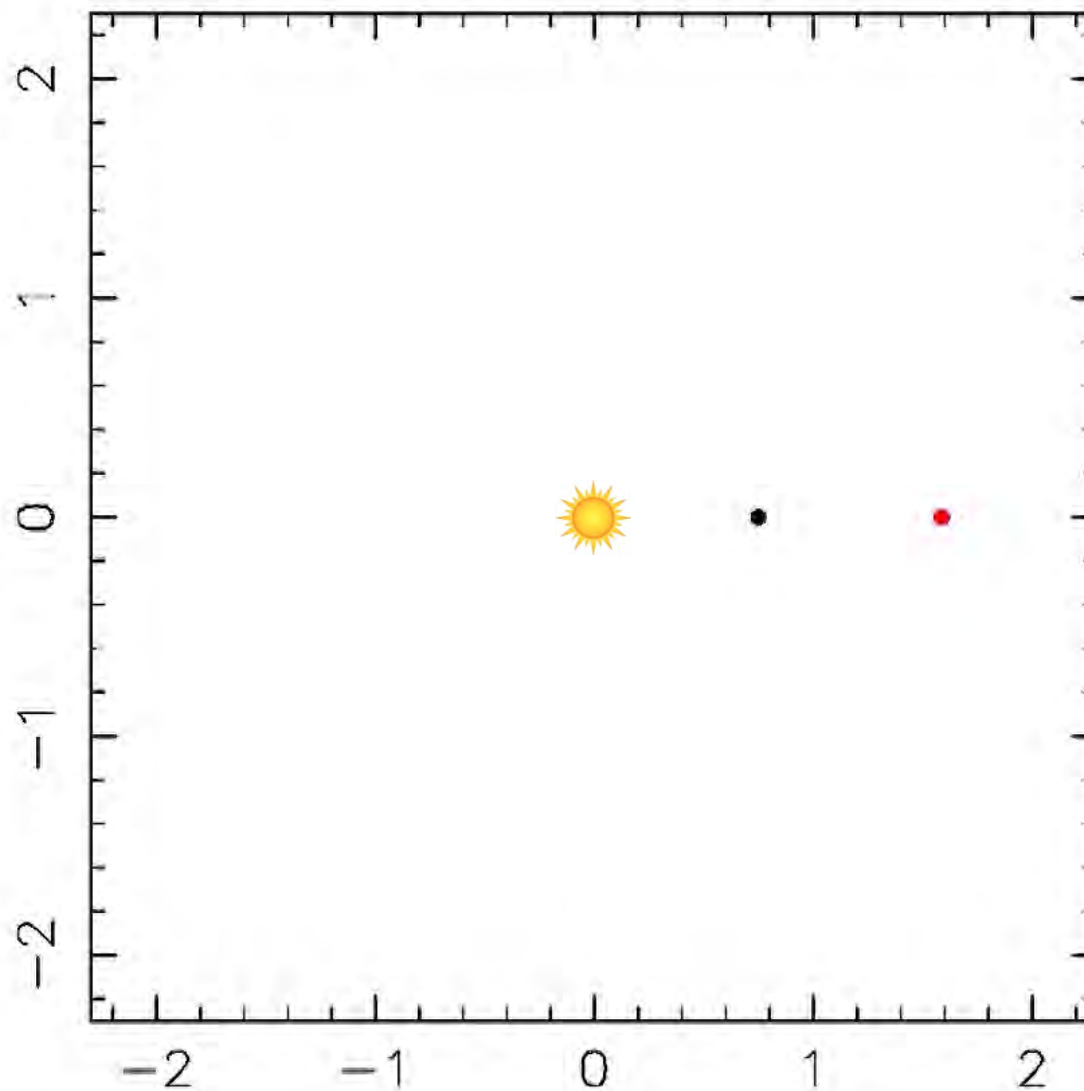
Résonance  $s = s_6$ : excite  
l'inclinaison de l'orbite de  
l'astéroïde.

A très haute inclinaison,  
l'orbite de l'astéroïde devient  
instable, excentrique





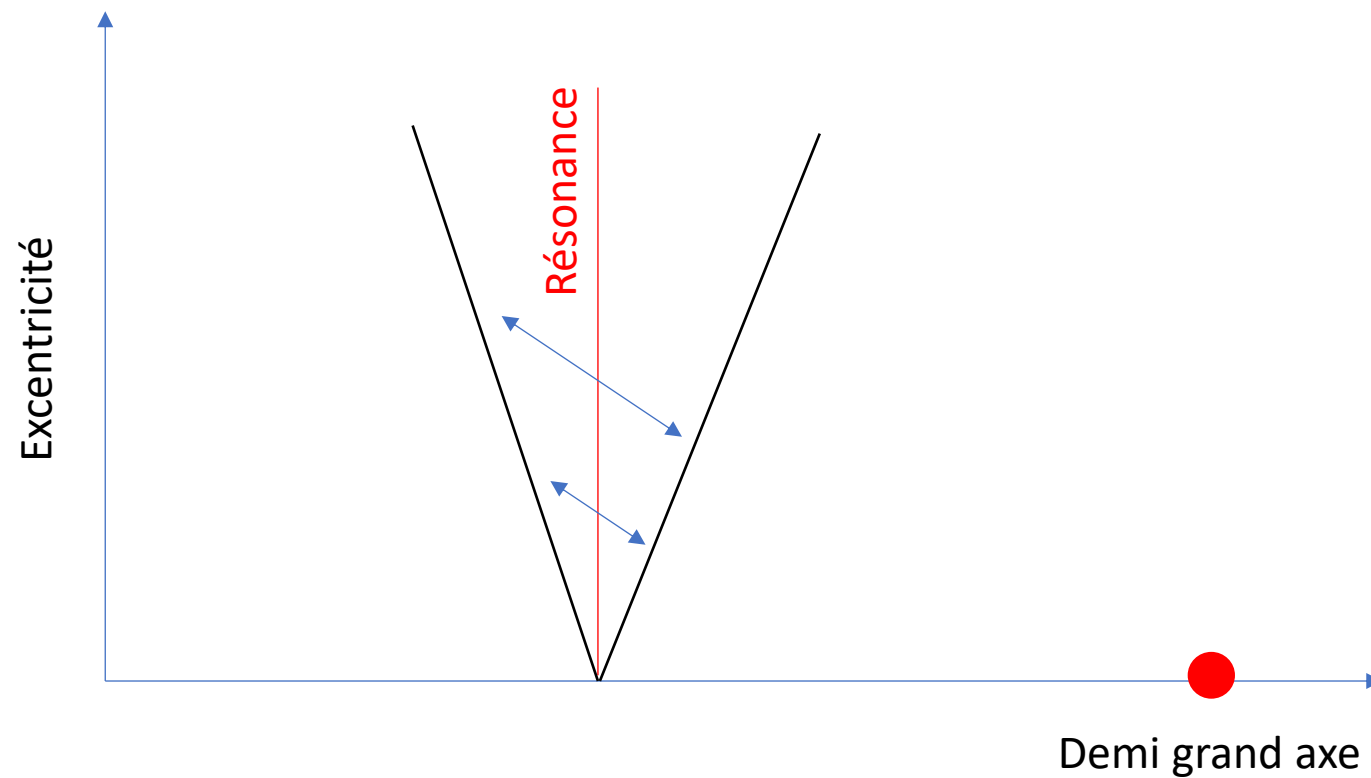
## Exemple de résonance (2:1)



- Planète (circulaire)
- Petit corps (elliptique)



# Librations résonnantes

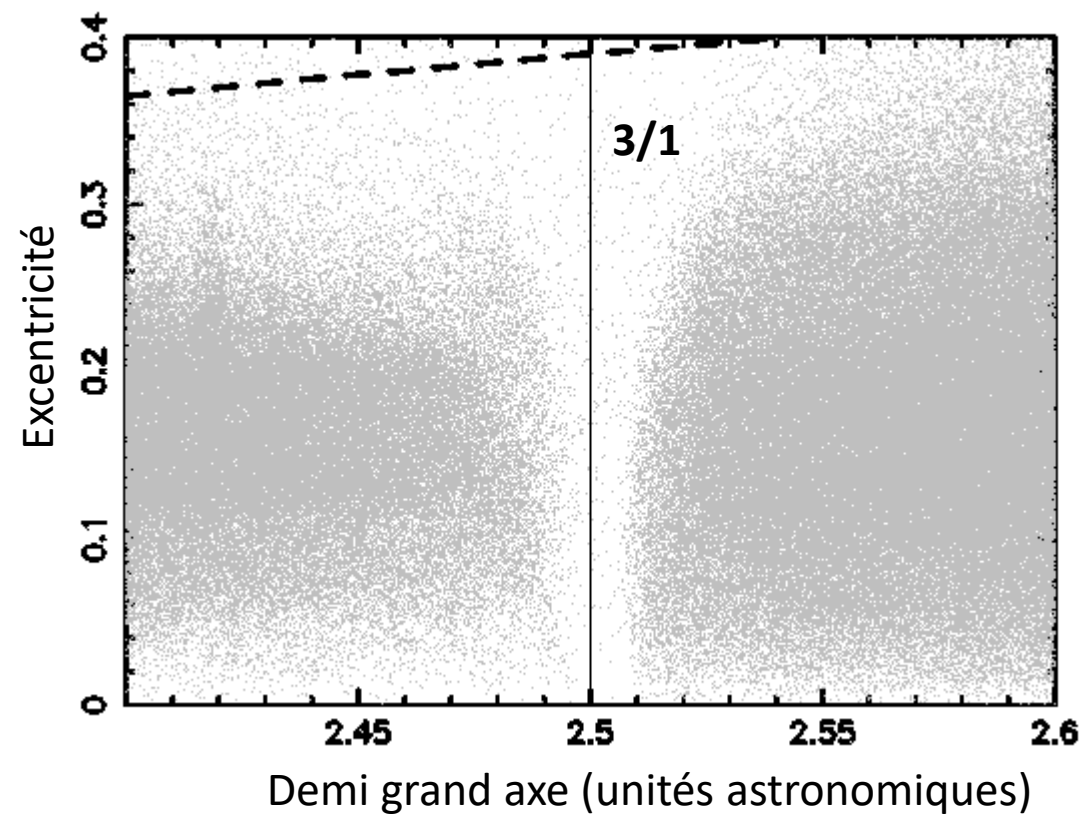
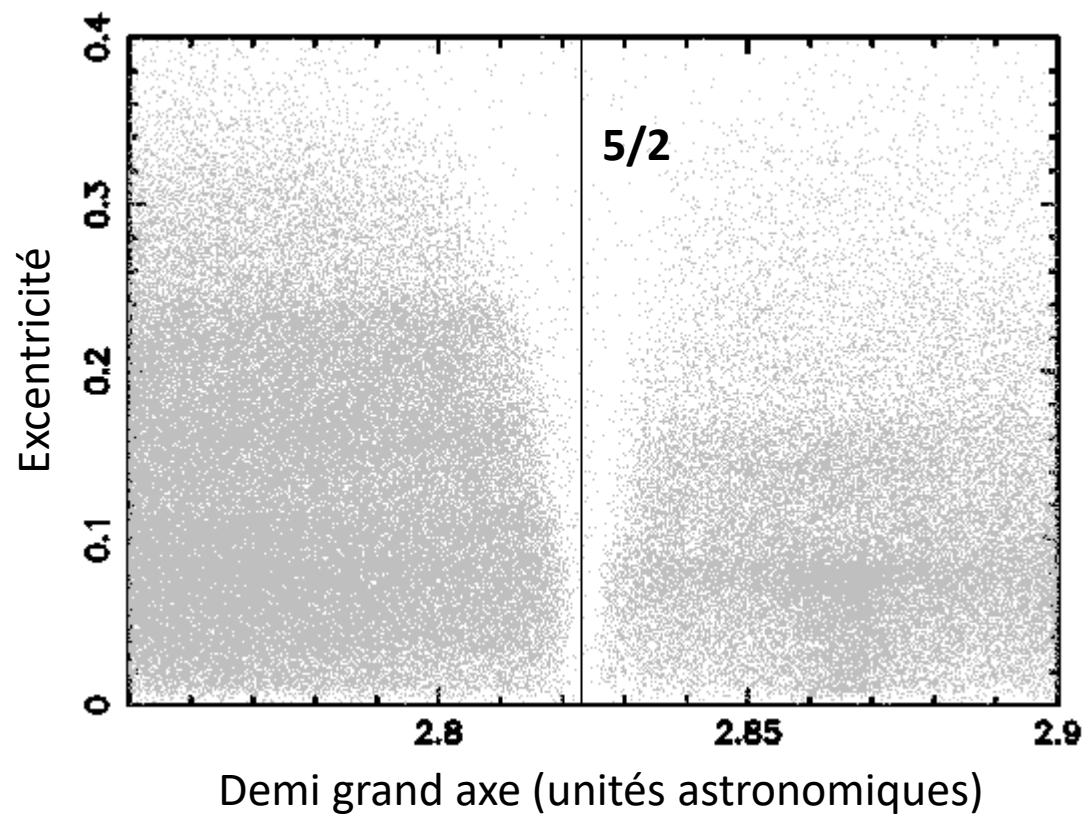


La résonance induit un mouvement oscillatoire autour de sa localisation exacte.





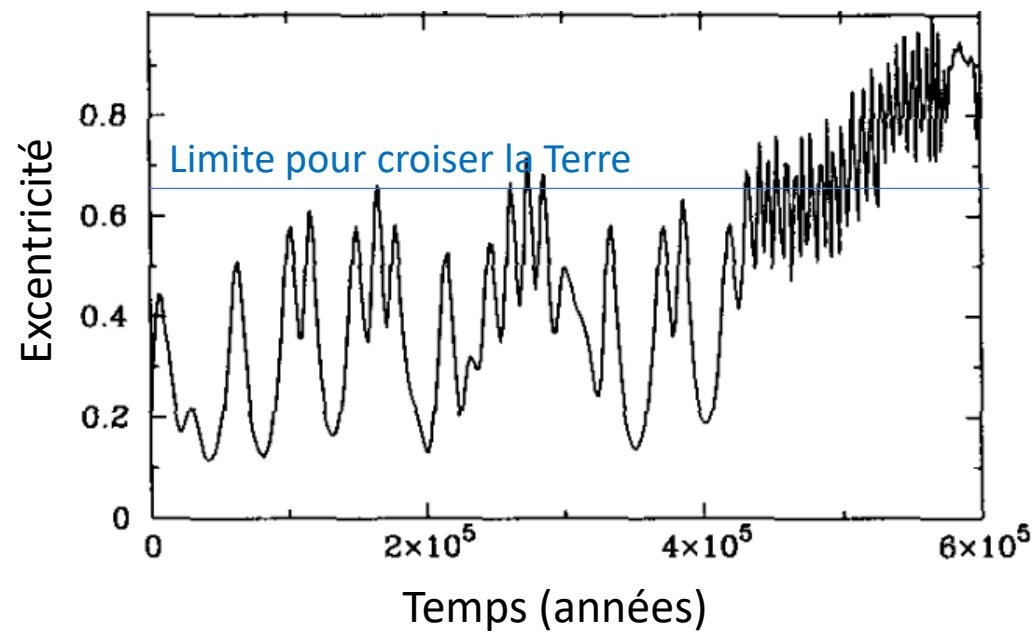
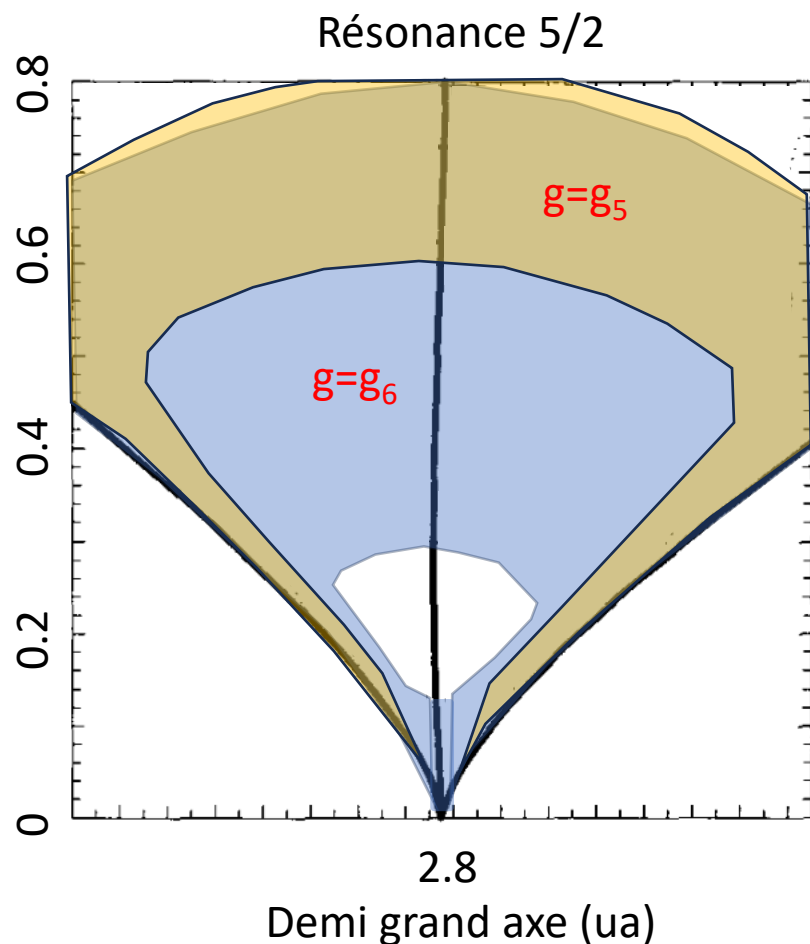
## Lacunes de Kirkwood et bords résonnants





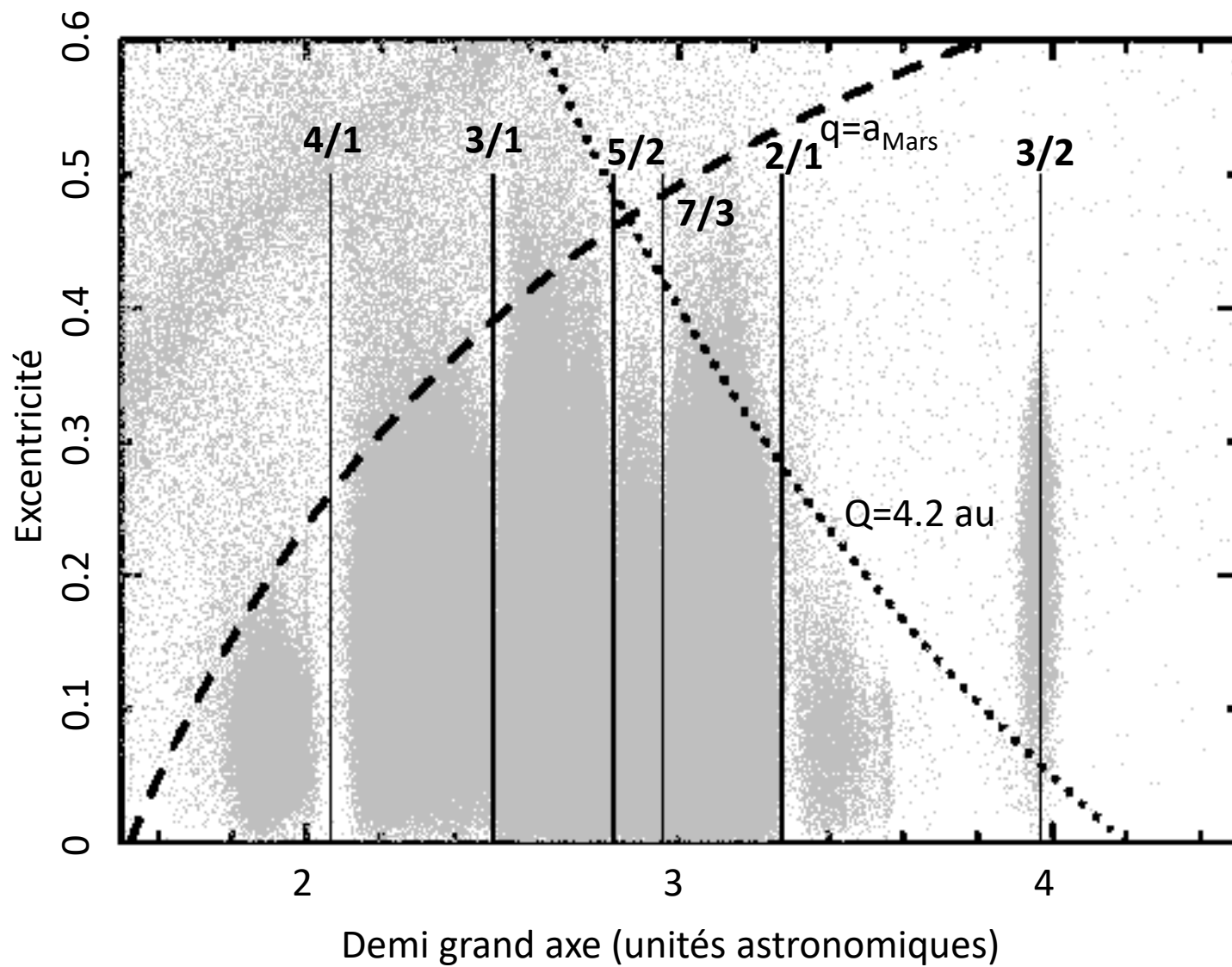
# Résonances séculaires dans les résonances de moyen mouvement

Wisdom, 1982, 1983; Morbidelli and Moons, 1993; Moons and Morbidelli, 1995



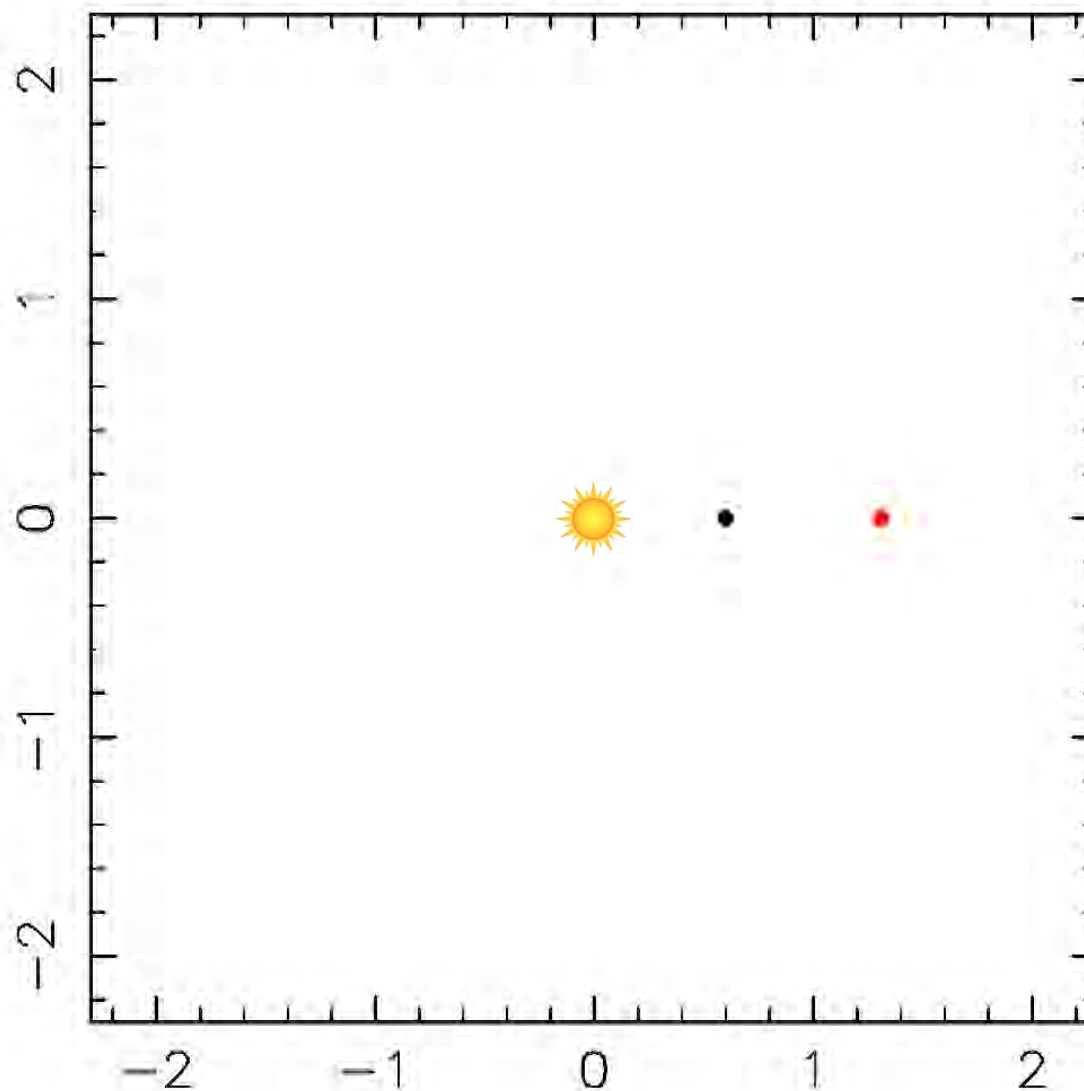


## Résonance 3/2 et astéroïdes Hilda





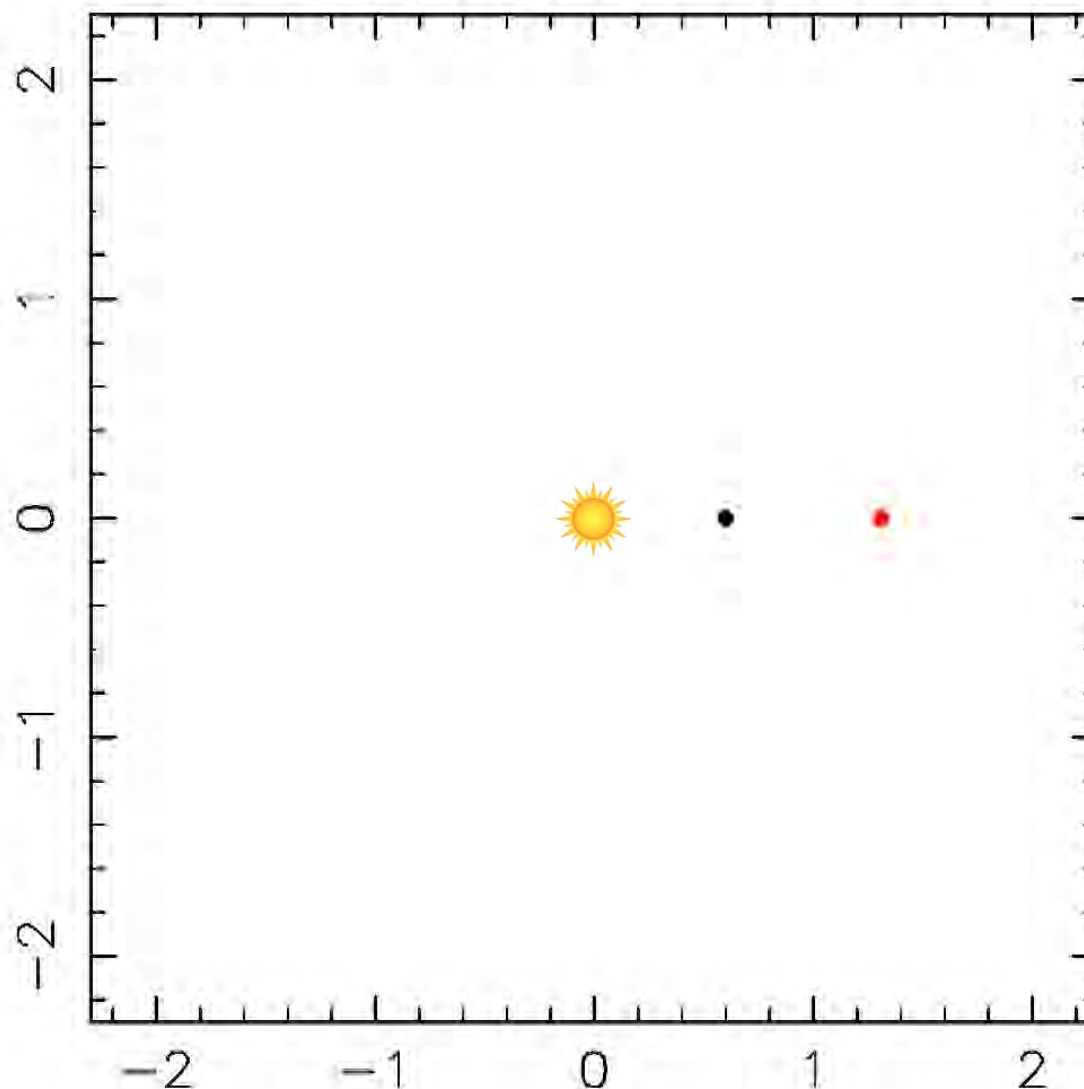
## Protection résonnante vis-à-vis des rencontres proches



- Planète (circulaire)
- Petit corps (très elliptique)



## Protection résonnante vis-à-vis des rencontres proches

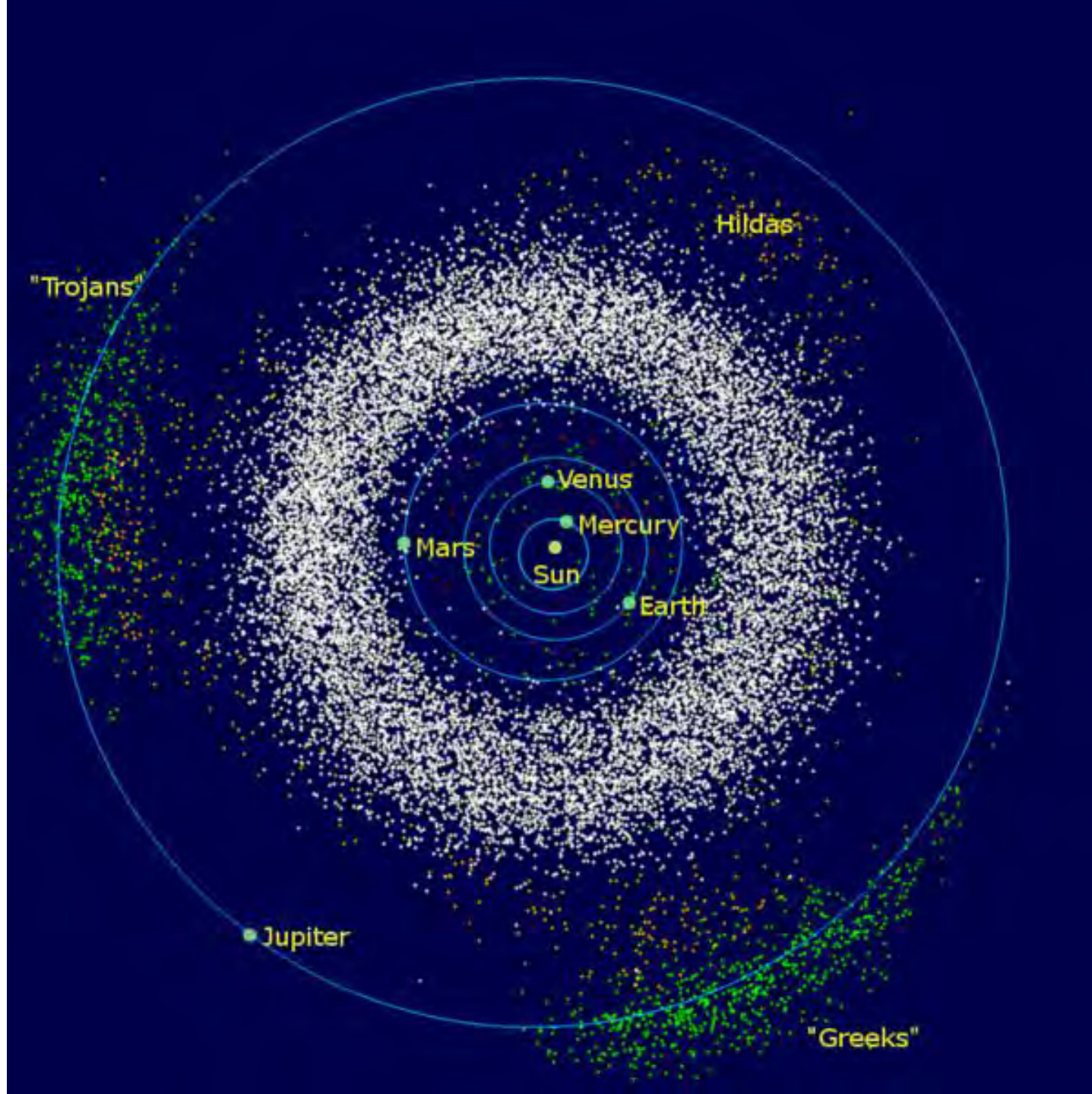


● Planète (circulaire)

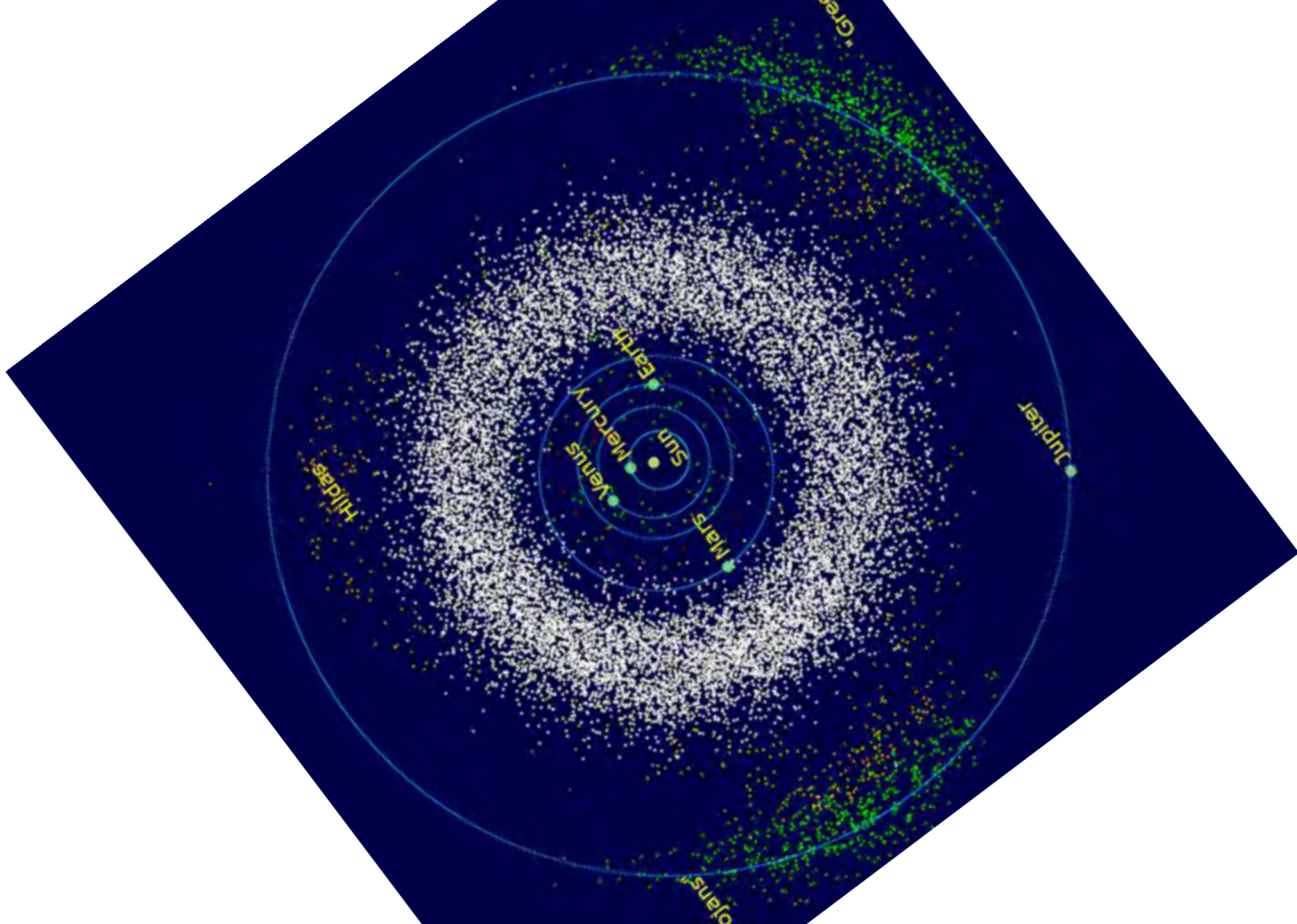
● Petit corps (très elliptique)

La même animation en  
coordonnées tournantes



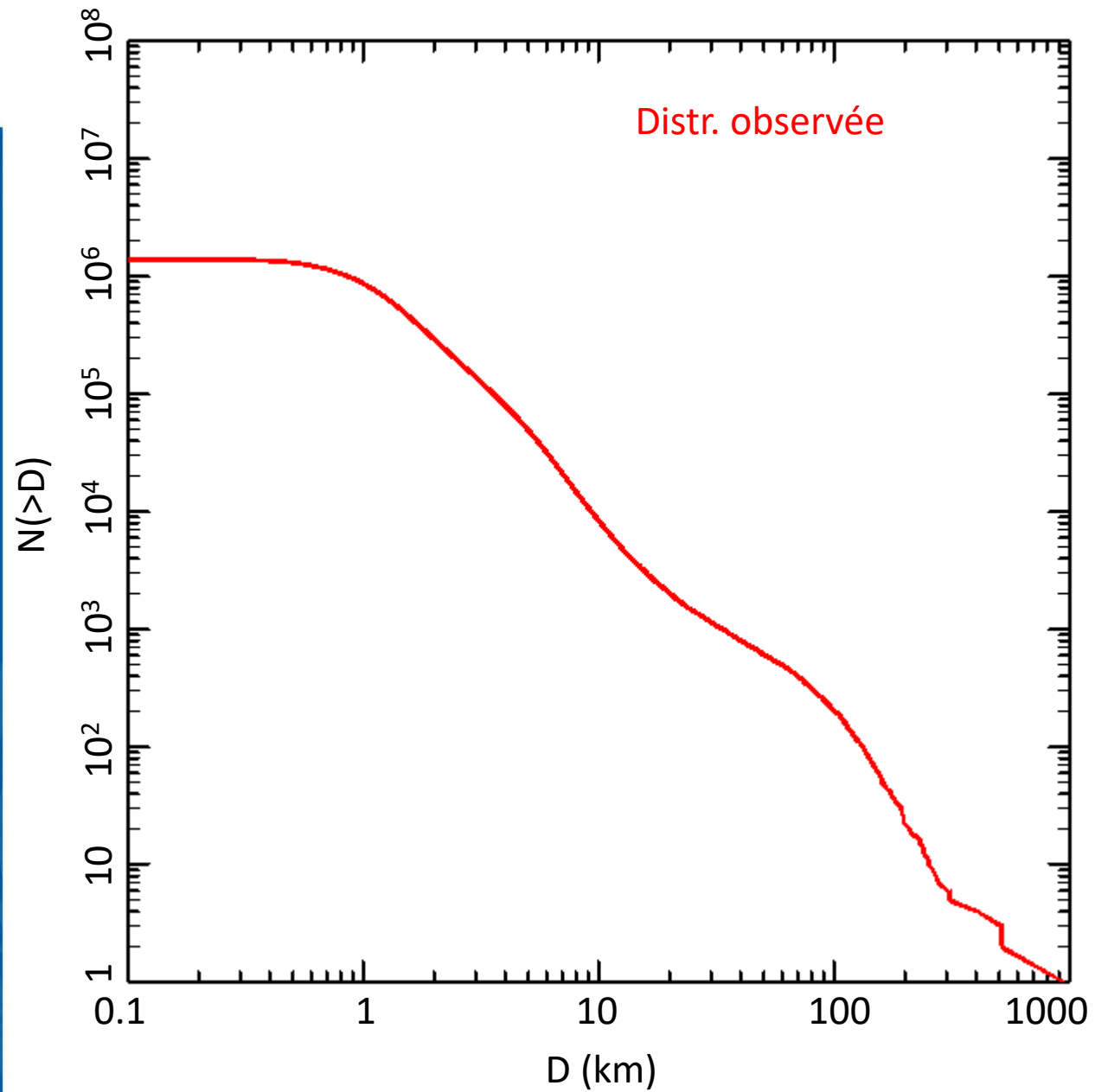






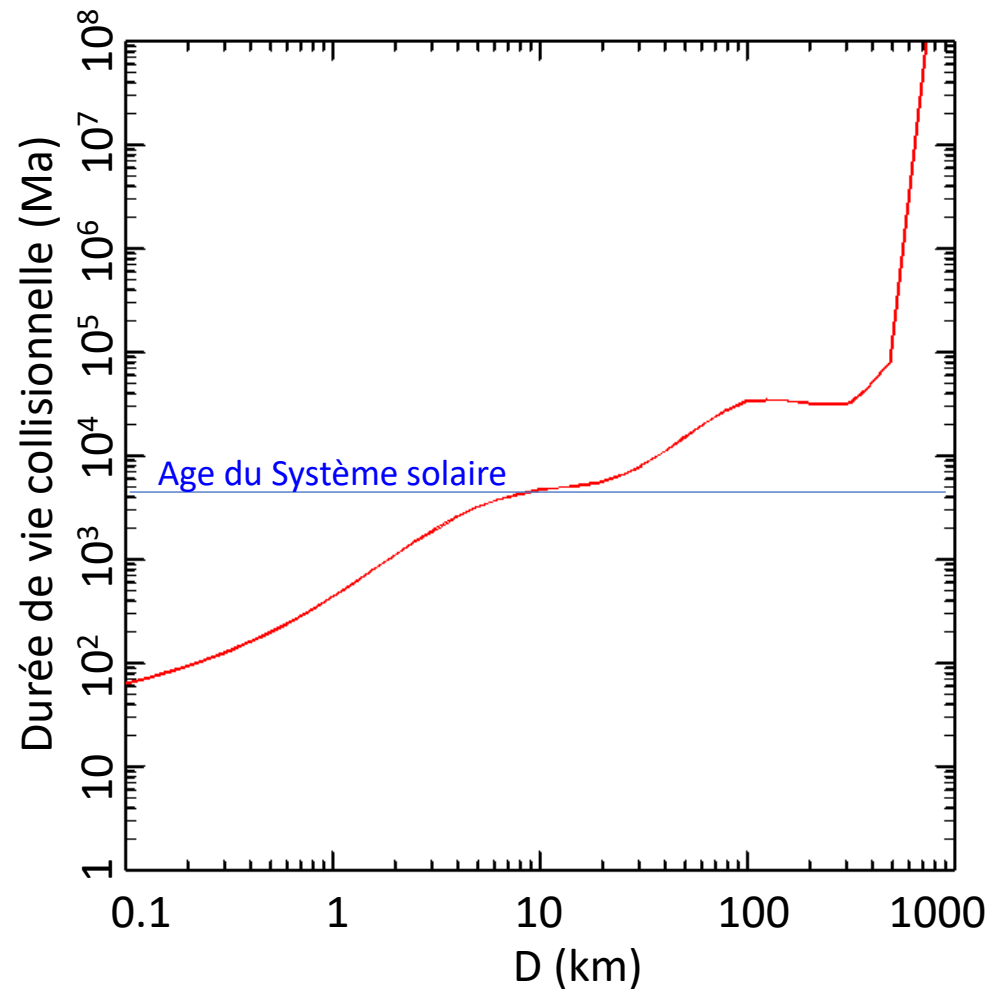
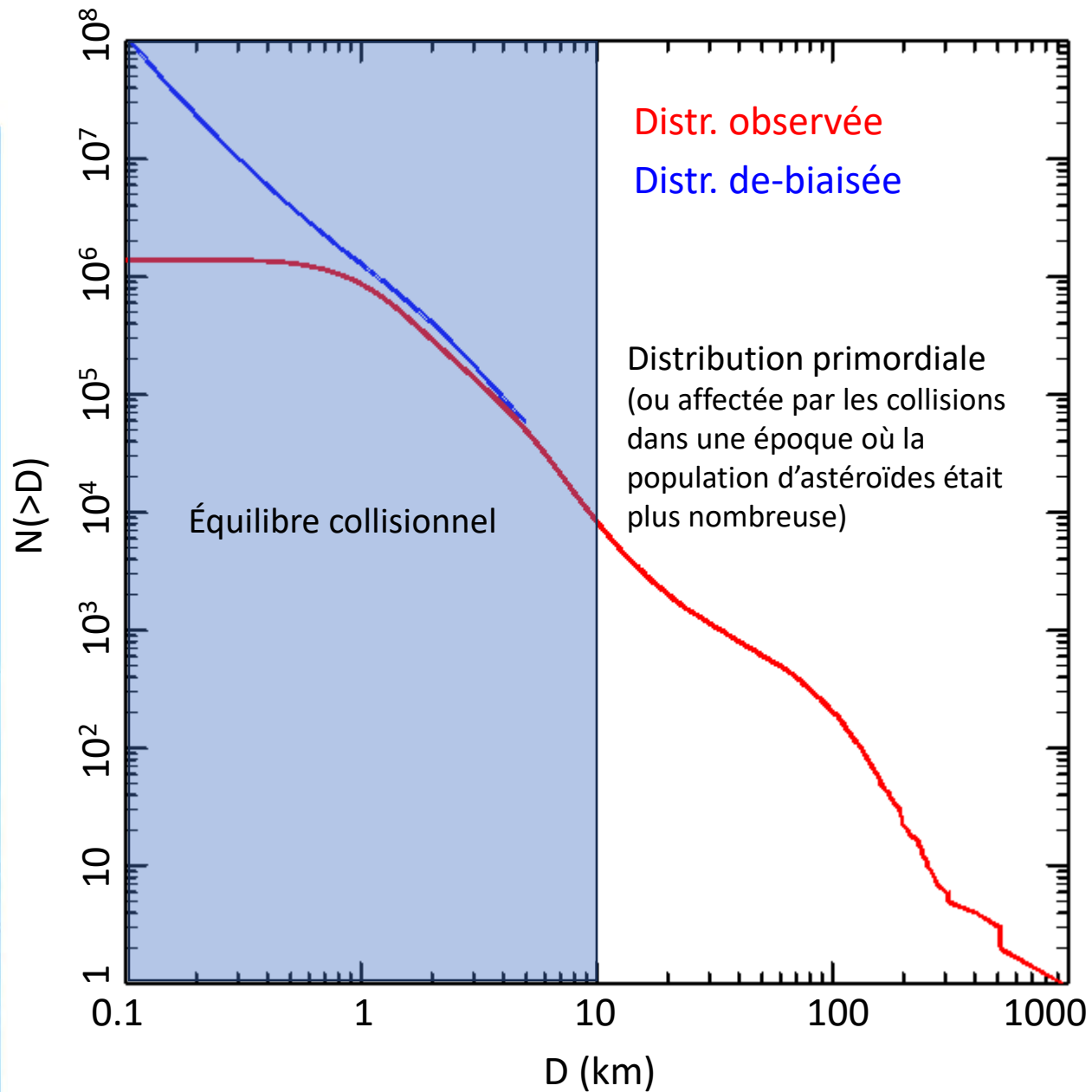


## La distribution des tailles des astéroïdes





# La distribution des tailles des astéroïdes







## Preuves de collisions: I) éjection soudaine de poussières

Astéroïde 596 Scheila  
27 Dec 2010



Pas de signes de dégazage

Même chose pour:

[493 Griseldis](#)

[354P/LINEAR](#)

[P/2016 G1](#)

Ils sont nommés  
“astéroïdes actifs”





## Preuves de collisions: I) éjection soudaine de poussières

Équivalent artificiel: impact de la mission DART sur Dimorphos, le satellite de Didymos

Didymos–Dimorphos System

Sep 27 01:06:21 | T+1.9 hrs

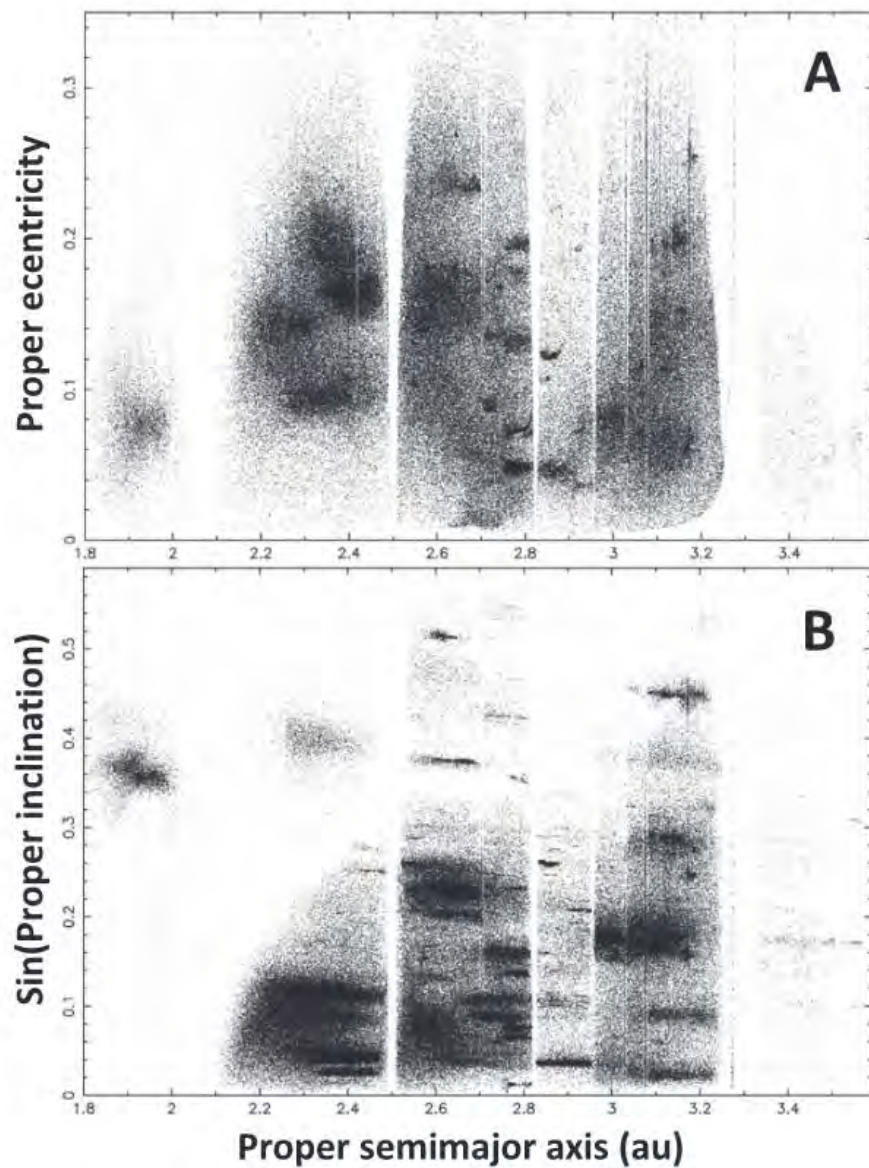
Projectile de 546kg  
 $V_{\text{imp}} = 5,8 \text{ km/s}$

ejecta cone



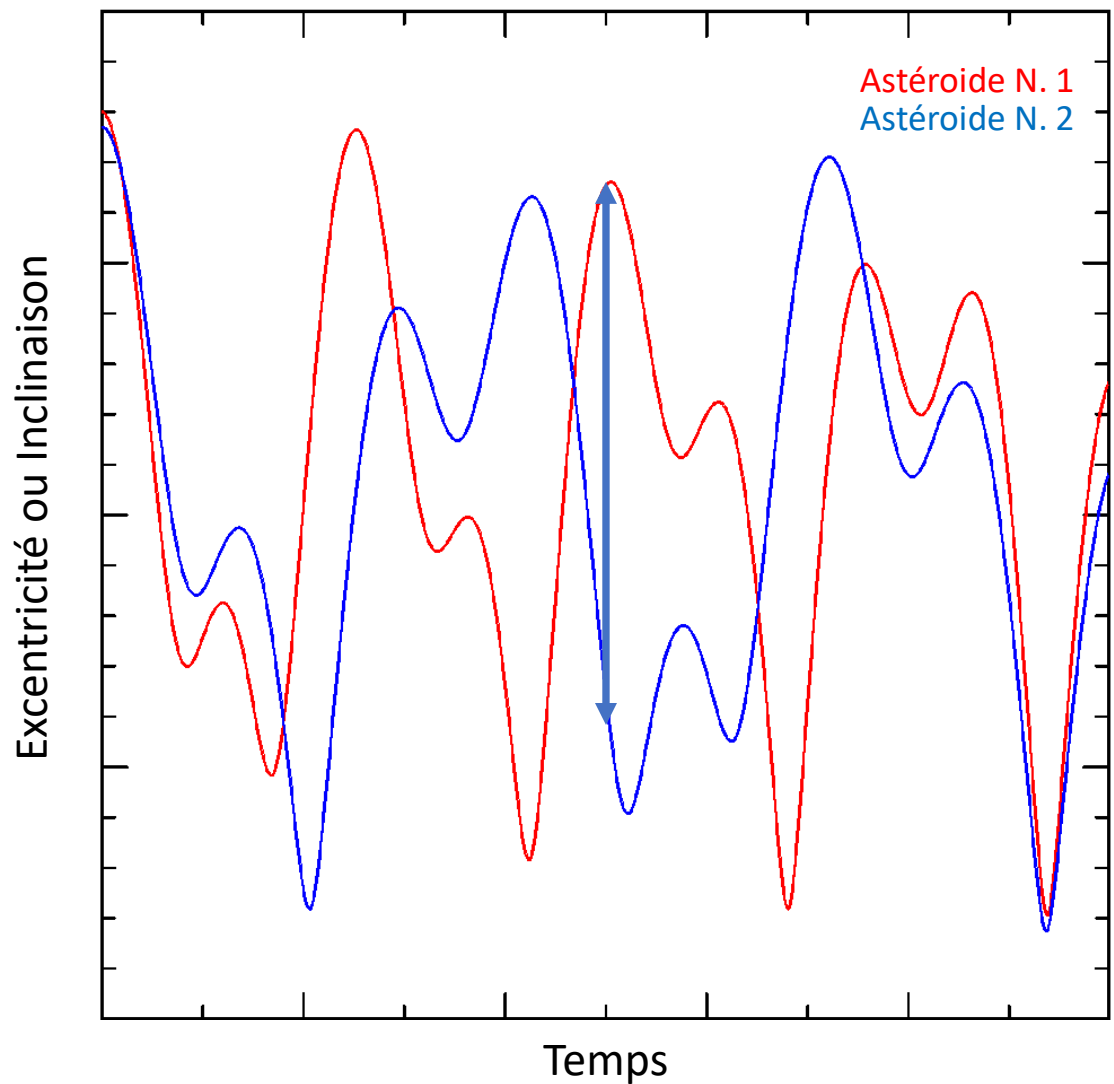


## Preuves de collisions: II) Les familles collisionnelles d'astéroïdes





## Oscillation des éléments orbitaux



Une petite différence initiale peut devenir une grande différence, selon la phase d'oscillation

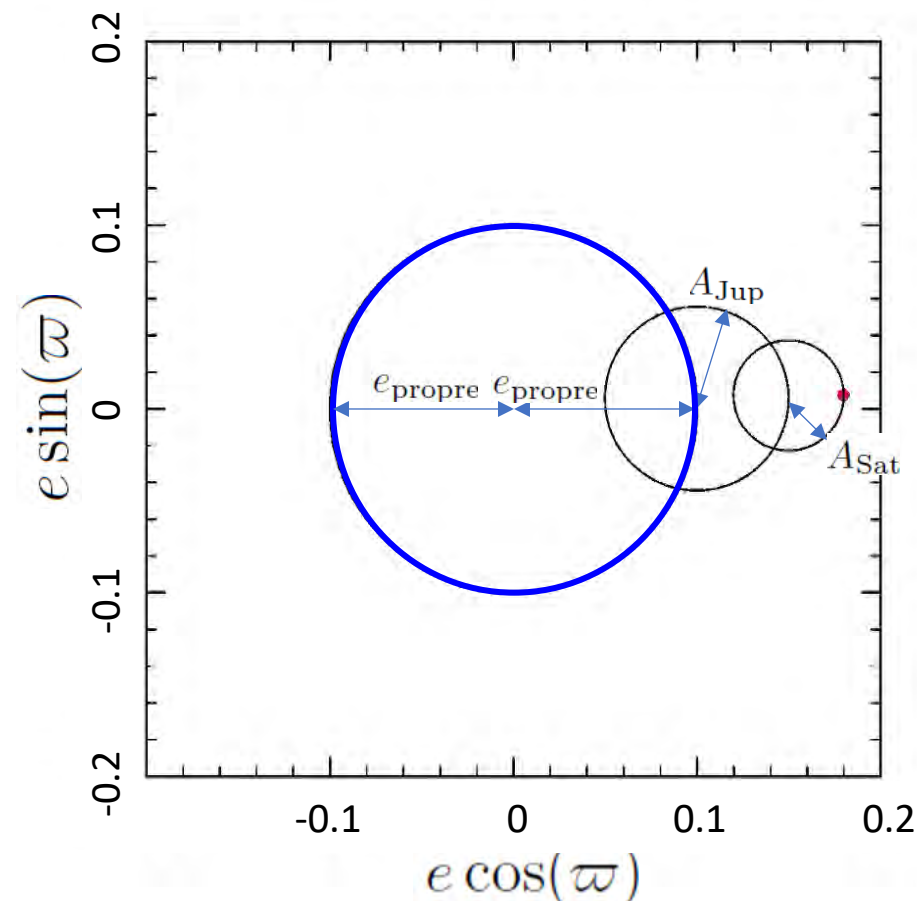


## Définition et calcul des éléments propres

Au premier ordre dans les excentricités (ou inclinaisons) des planètes, l'excentricité (ou l'inclinaison) d'un astéroïde oscille selon la loi:

$$e \cos(\varpi) = e_{\text{propre}} \cos(gt + \varpi_0) + A_{\text{Jup}} \cos(g_5 t + \varpi_{0,5}) + A_{\text{Sat}} \cos(g_6 t + \varpi_{0,6})$$

$$e \sin(\varpi) = e_{\text{propre}} \sin(gt + \varpi_0) + A_{\text{Jup}} \sin(g_5 t + \varpi_{0,5}) + A_{\text{Sat}} \sin(g_6 t + \varpi_{0,6})$$







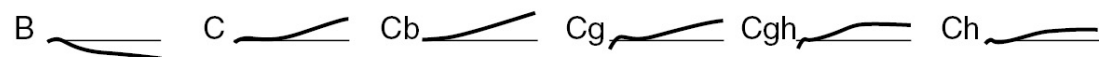
# Classification spectrale des astéroïdes

S-complex

Bandes du pyroxene + olivine



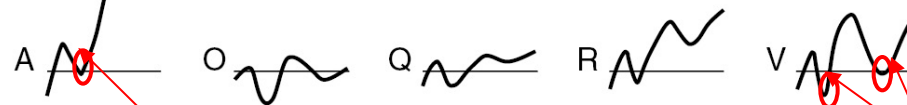
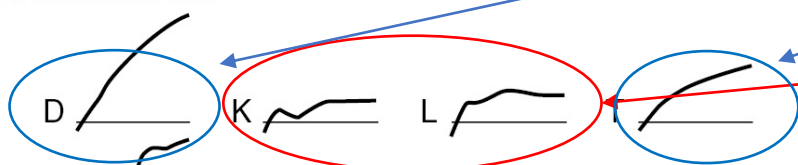
C-complex



X-complex



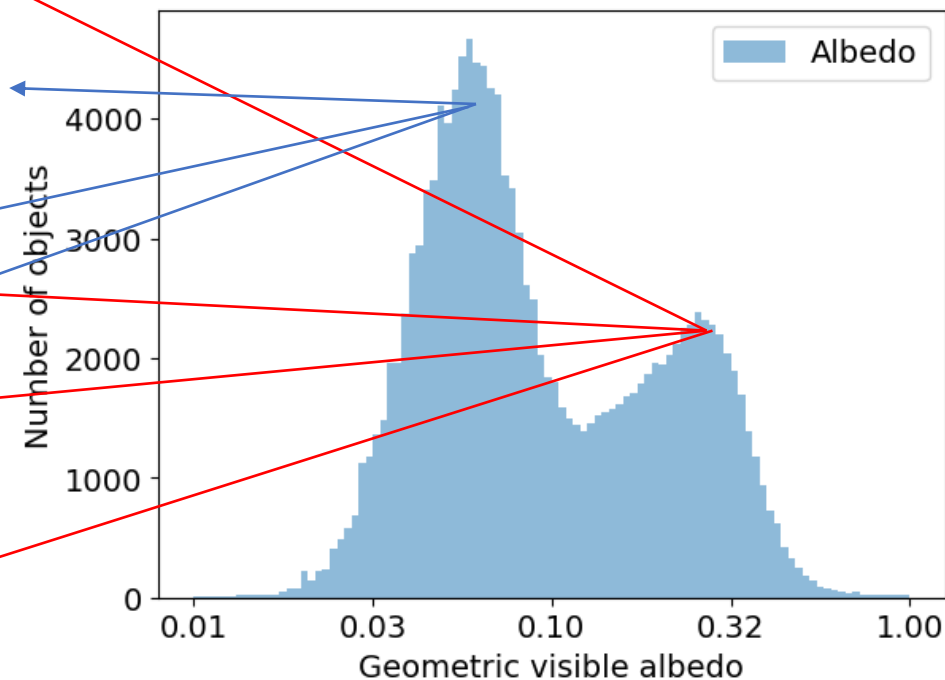
End members



Bande de l'olivine

Bandes du pyroxene + plagioclase

Distribution d'albédo

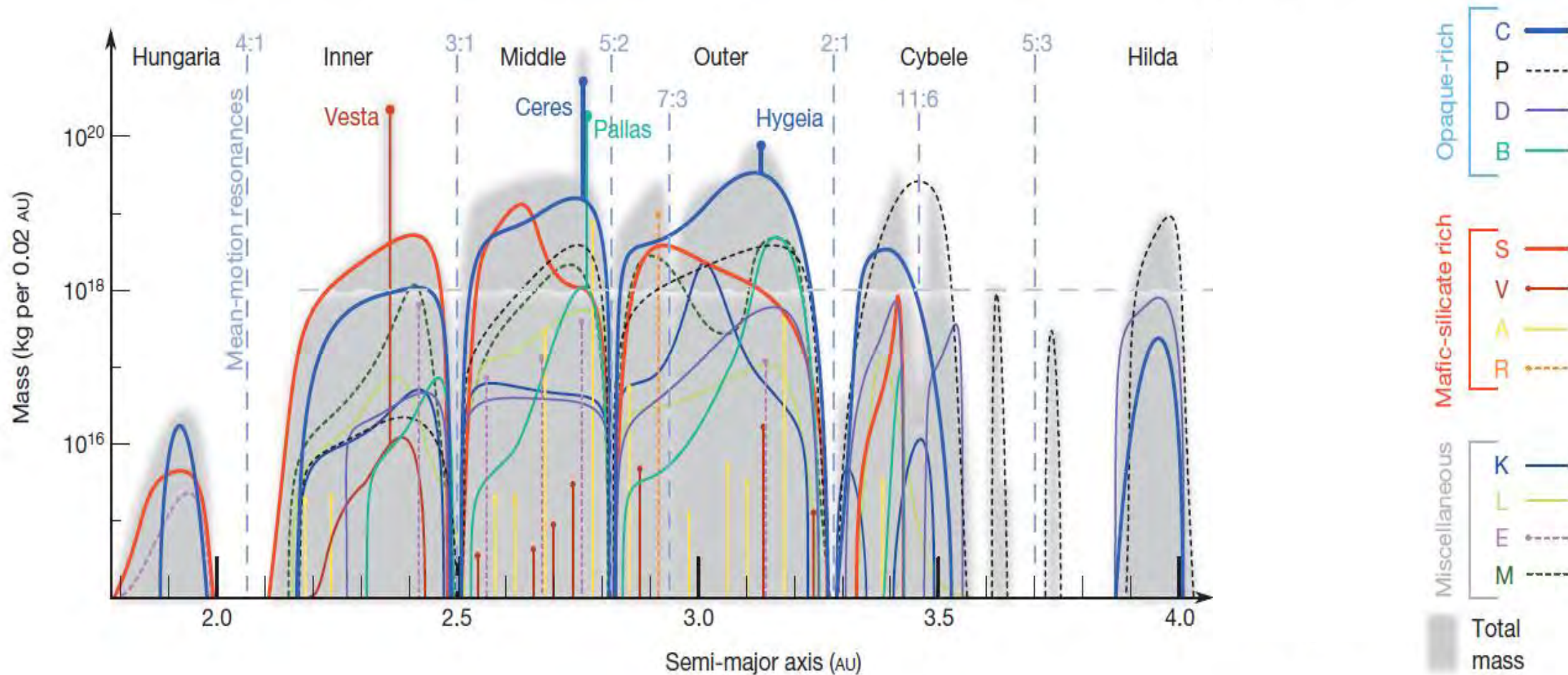


De Meo et al., 2009

M. Delbo (service MP3C)



## Distribution des classes spectrales dans la ceinture principale





## Classification des astéroïdes par couleur (indice spectral)

Bandes spectrales:

u: 355,1 +/- 30 nm

g: 468,6 +/- 70 nm

r: 616,6 +/- 70 nm

i: 748,0 +/- 75 nm

z: 893,2 +/- 60 nm

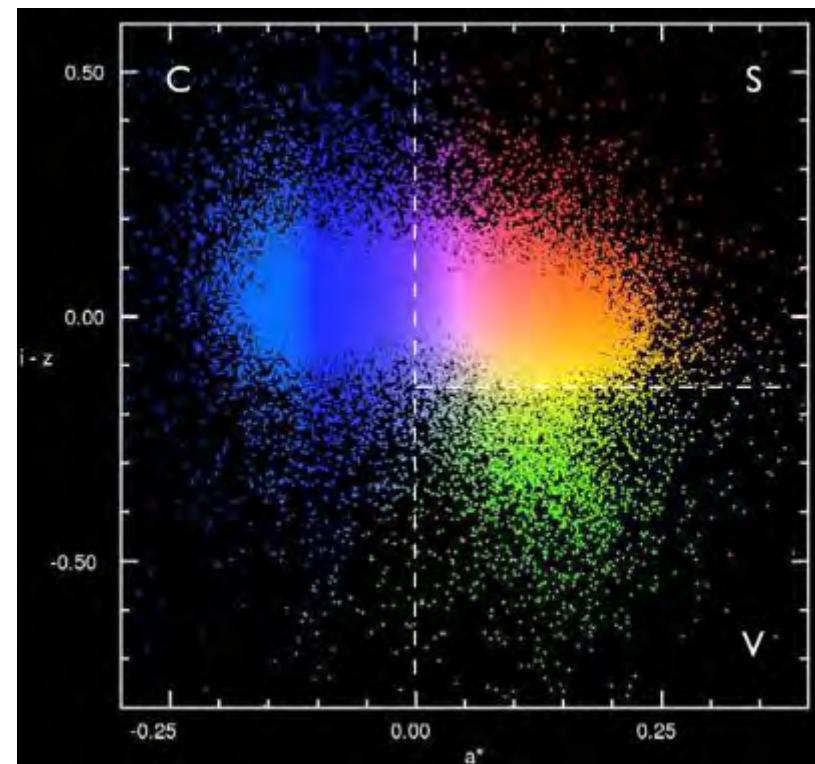
Indice spectral:

Différence de luminosité mesurée dans des bandes spectrales proches (ex. z-i, r-g)

Analyse en composantes principales:

Trouver les deux combinaisons d'indices spectraux qui maximisent les différences entre objets

Pour SDSS:  $i-z$  et  $a^* \equiv 0.89(g - r) + 0.45(r - i) - 0.57$



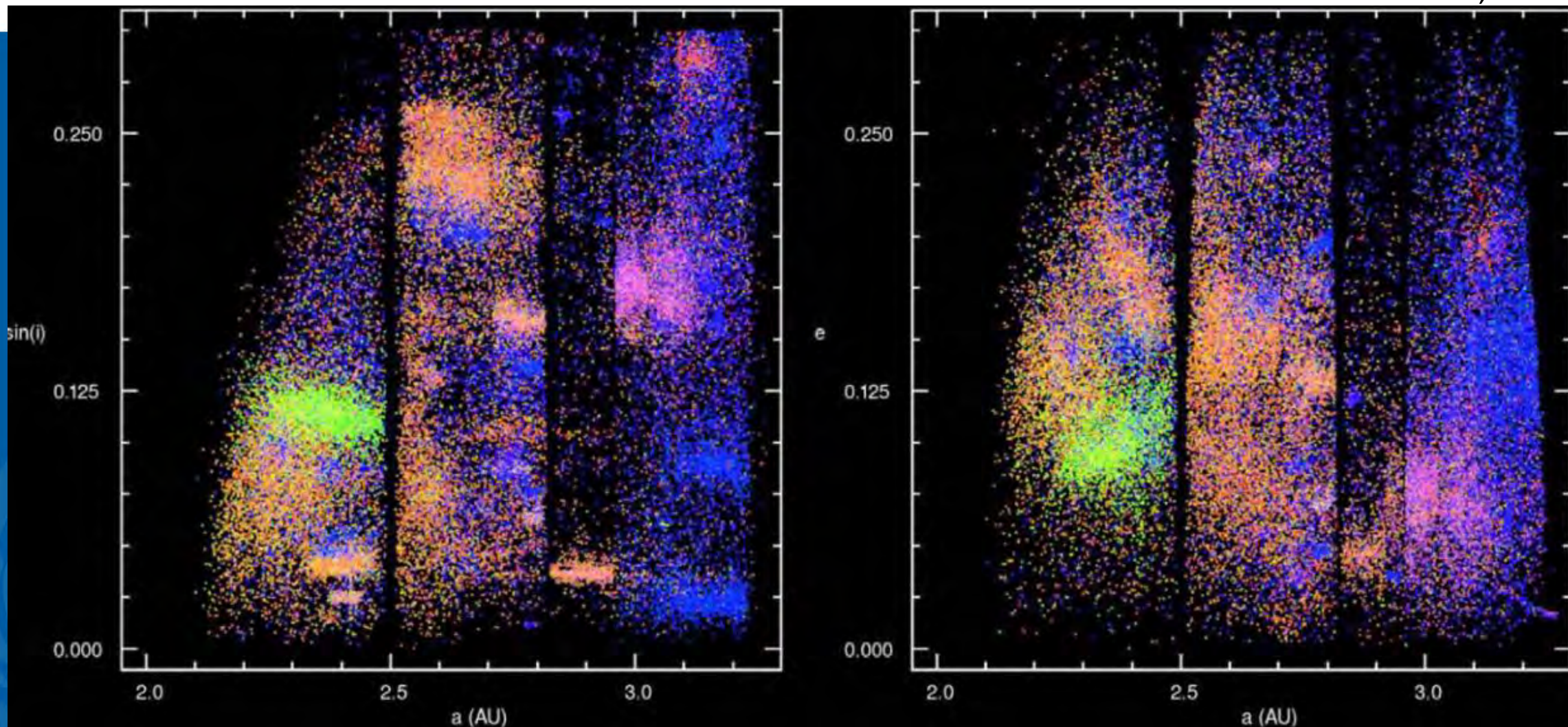
Parker et al., 2008





## Distribution des couleurs dans la ceinture des astéroïdes

Parker et al., 2008



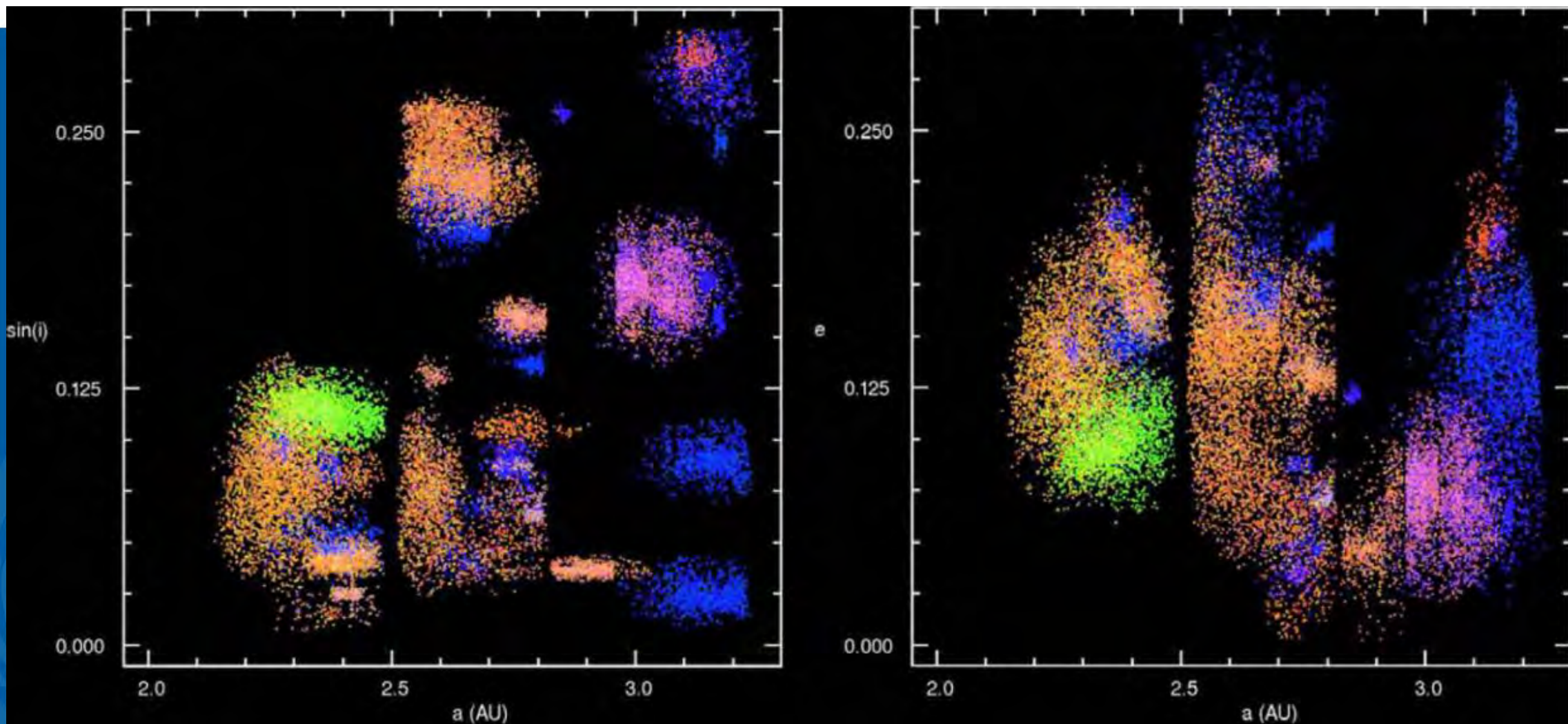
Les familles se distinguent comme des taches de couleur uniforme, ce qui est cohérent avec l'origine collisionnelle à partir d'un corps parent unique





# Familles d'astéroïdes

Parker et al., 2008

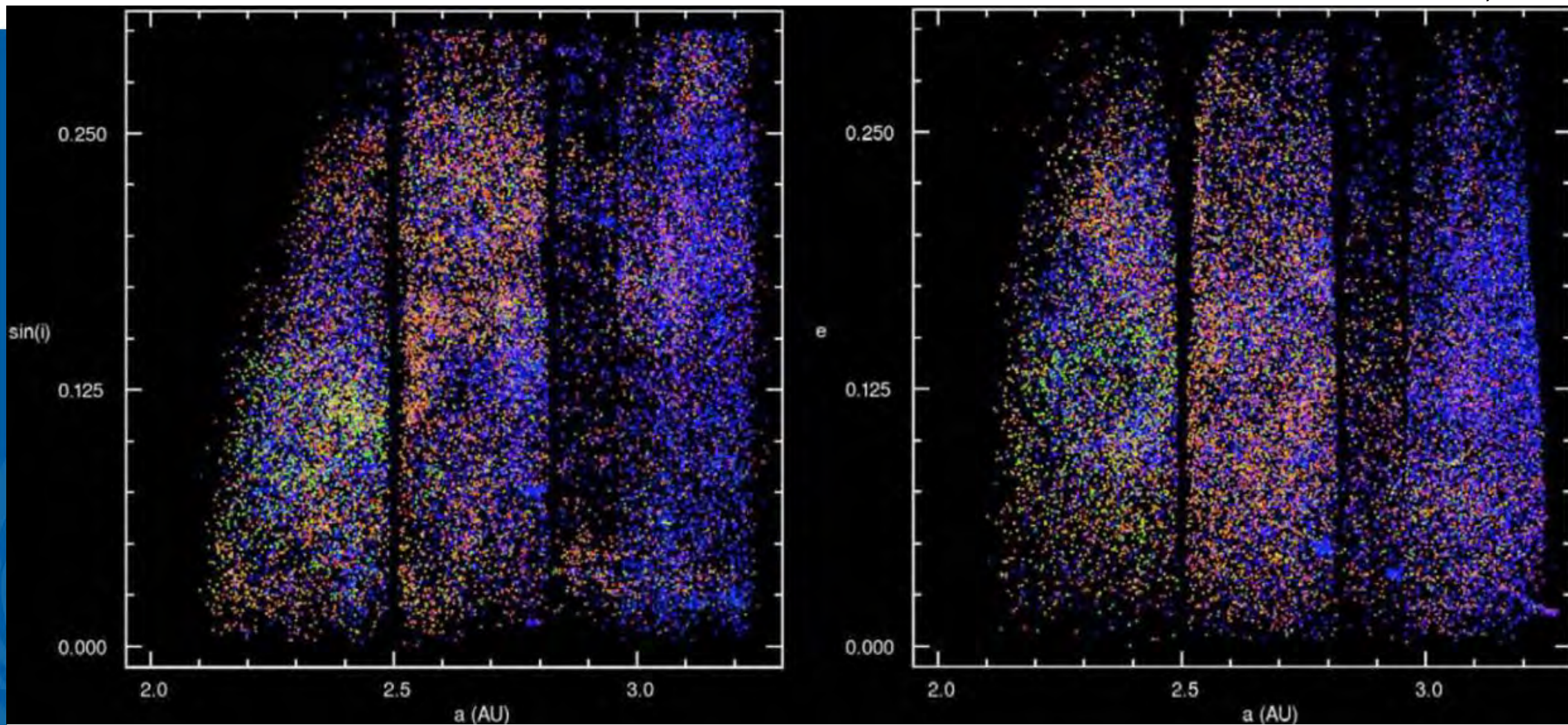






## Background

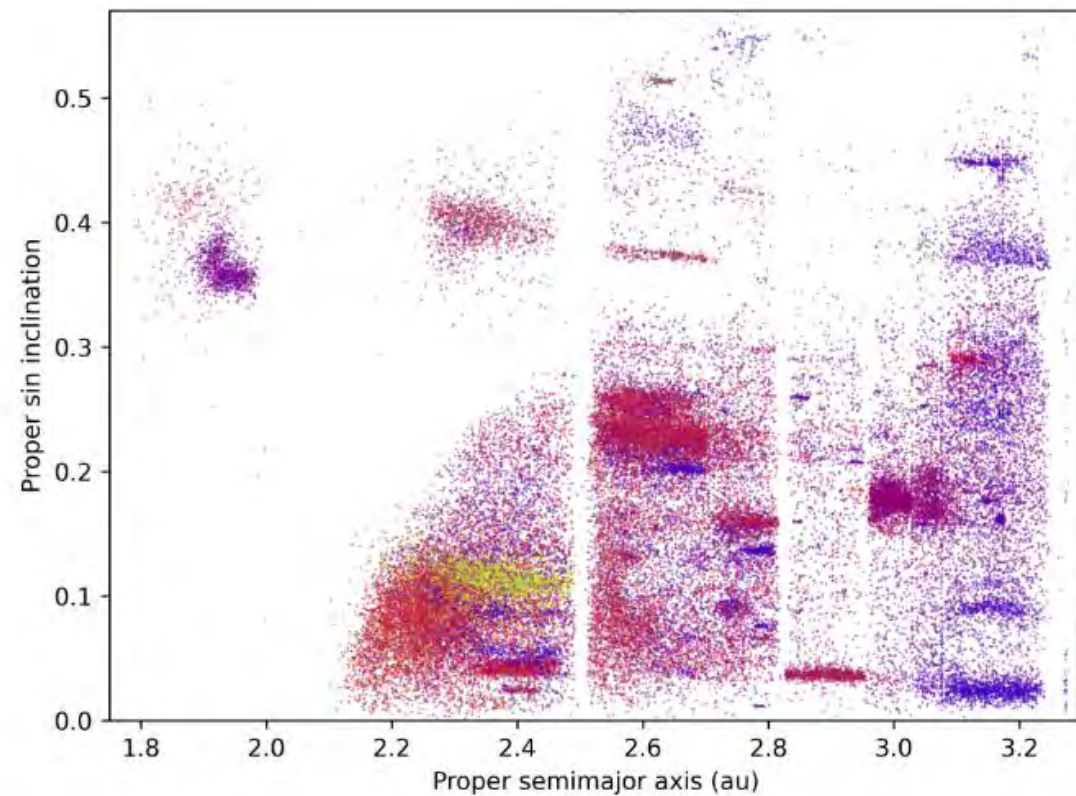
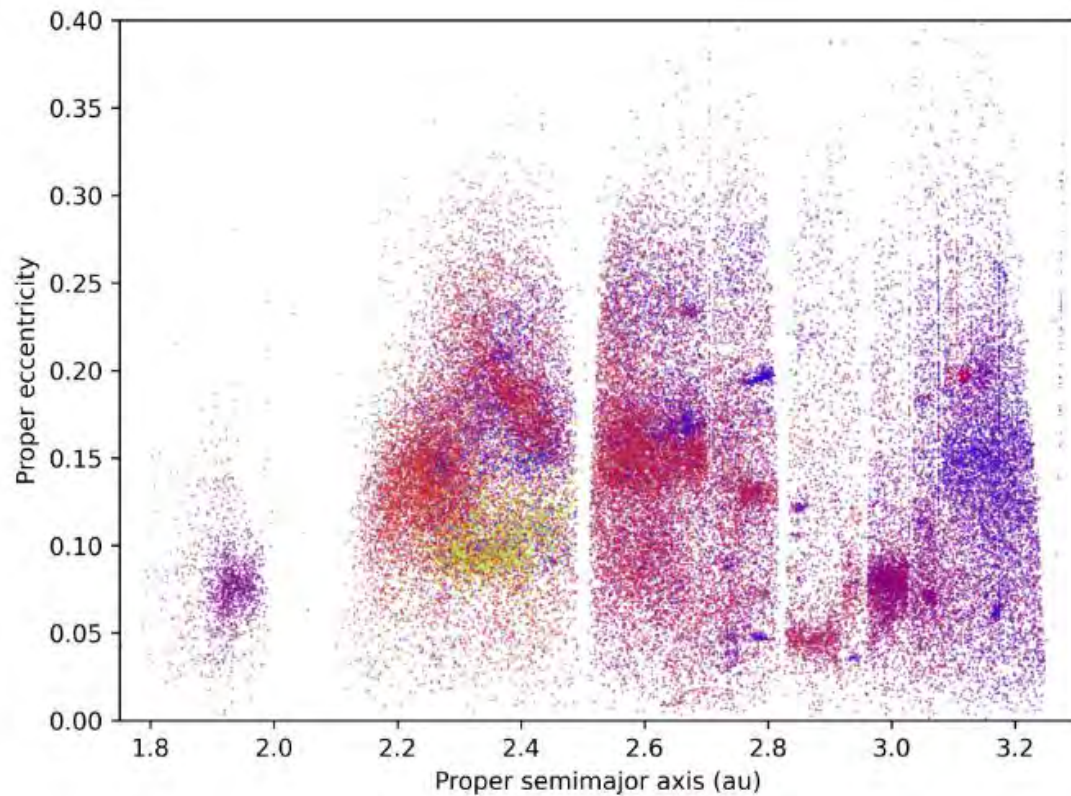
Parker et al., 2008







## Carte de couleurs par Gaia



Galluccio et al., 2023





## L'astéroïde Cérès

Premier astéroïde découvert (1801)

Le plus gros de la ceinture:  $D=940$  km

Il contient 40% de la masse totale de la ceinture

Type spectroscopique C (G pour la présence d'argile)

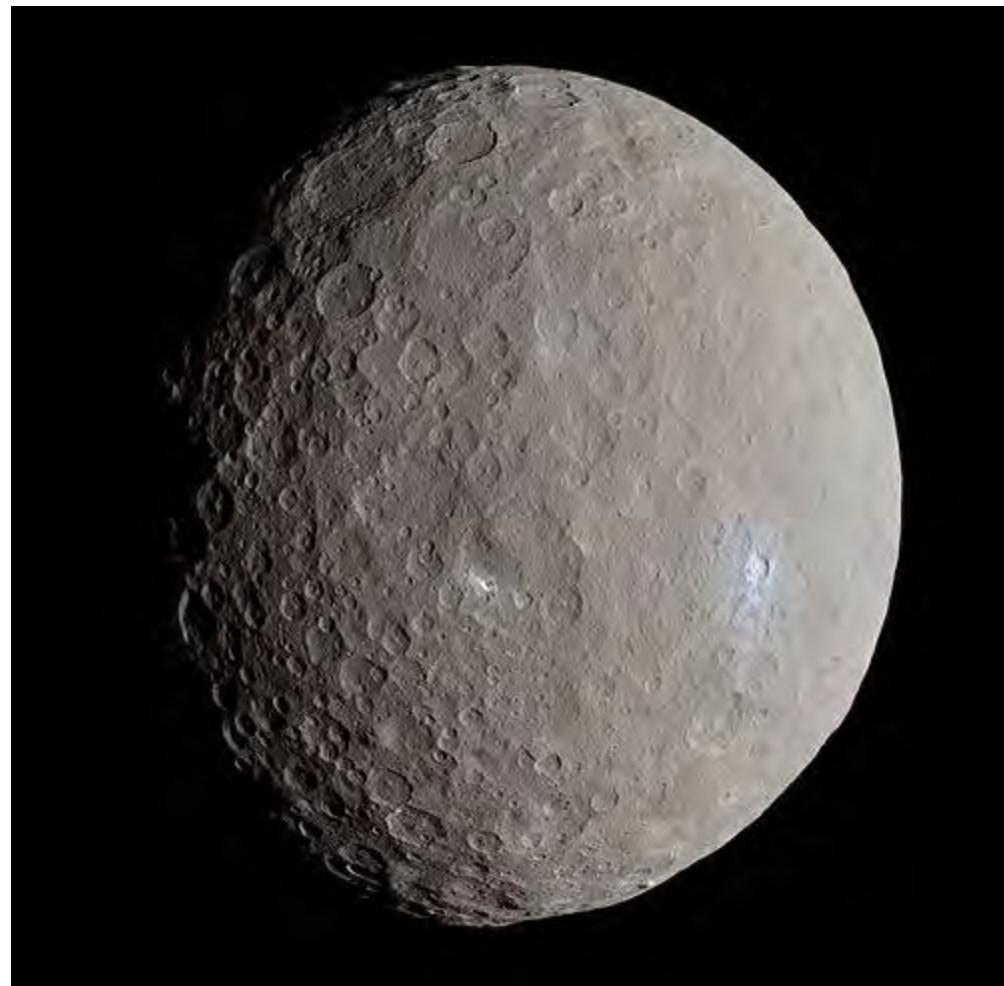
Visité par la sonde Dawn (NASA) pendant en 2015-2018

Composition de surface:

Riche en carbonates, argiles et phyllosilicates riches en ammonium, altérés par l'eau. 20% de la masse en C, 10% en  $H_2O$  vers les régions polaires.

Albédo: 0,075

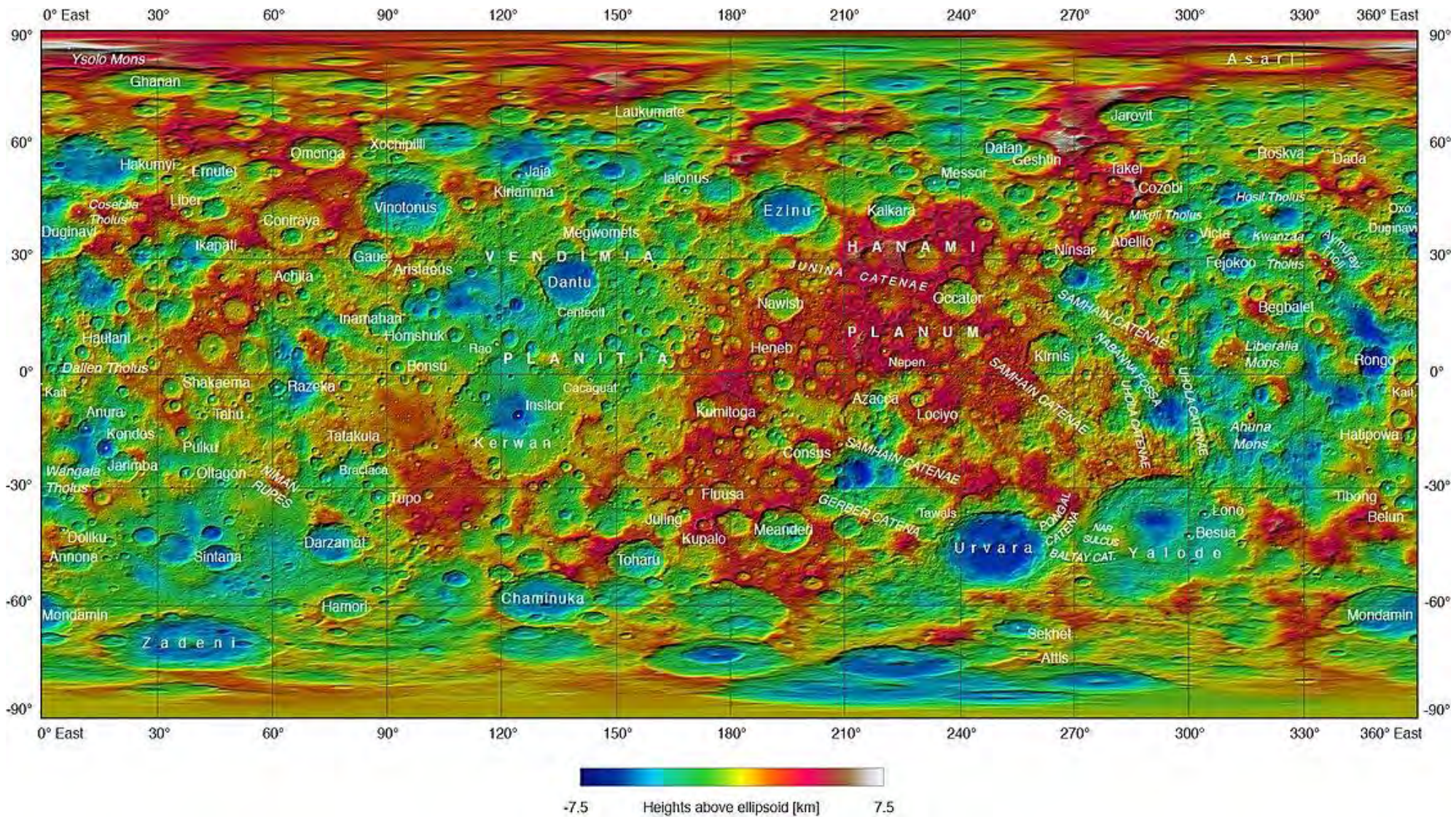
Densité:  $2,08 \text{ g/cm}^3$







# L'astéroïde Cérès



Beaucoup de cratères, mais moins que attendu. Probablement les cratères plus anciens ont été effacés par la relaxation visqueuse de la croûte ou le cryovolcanisme.

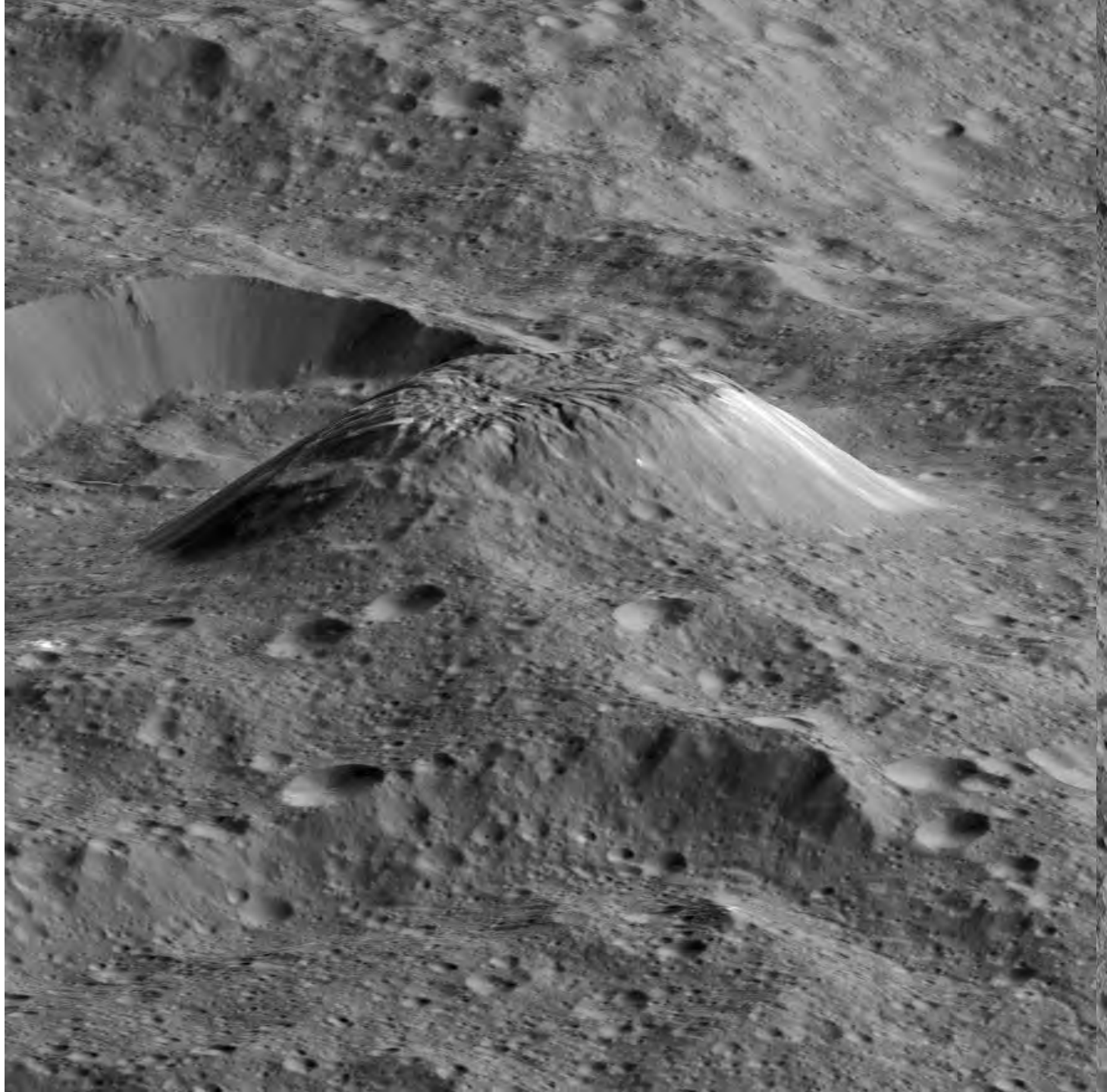




## L'astéroïde Cérès

Ahuna Mons: exemple de cryo-volcan, avec une hauteur de  $\sim 3$  km

On estime que un cryo-volcan se forme sur Cérès tous les 50 millions d'années en moyenne

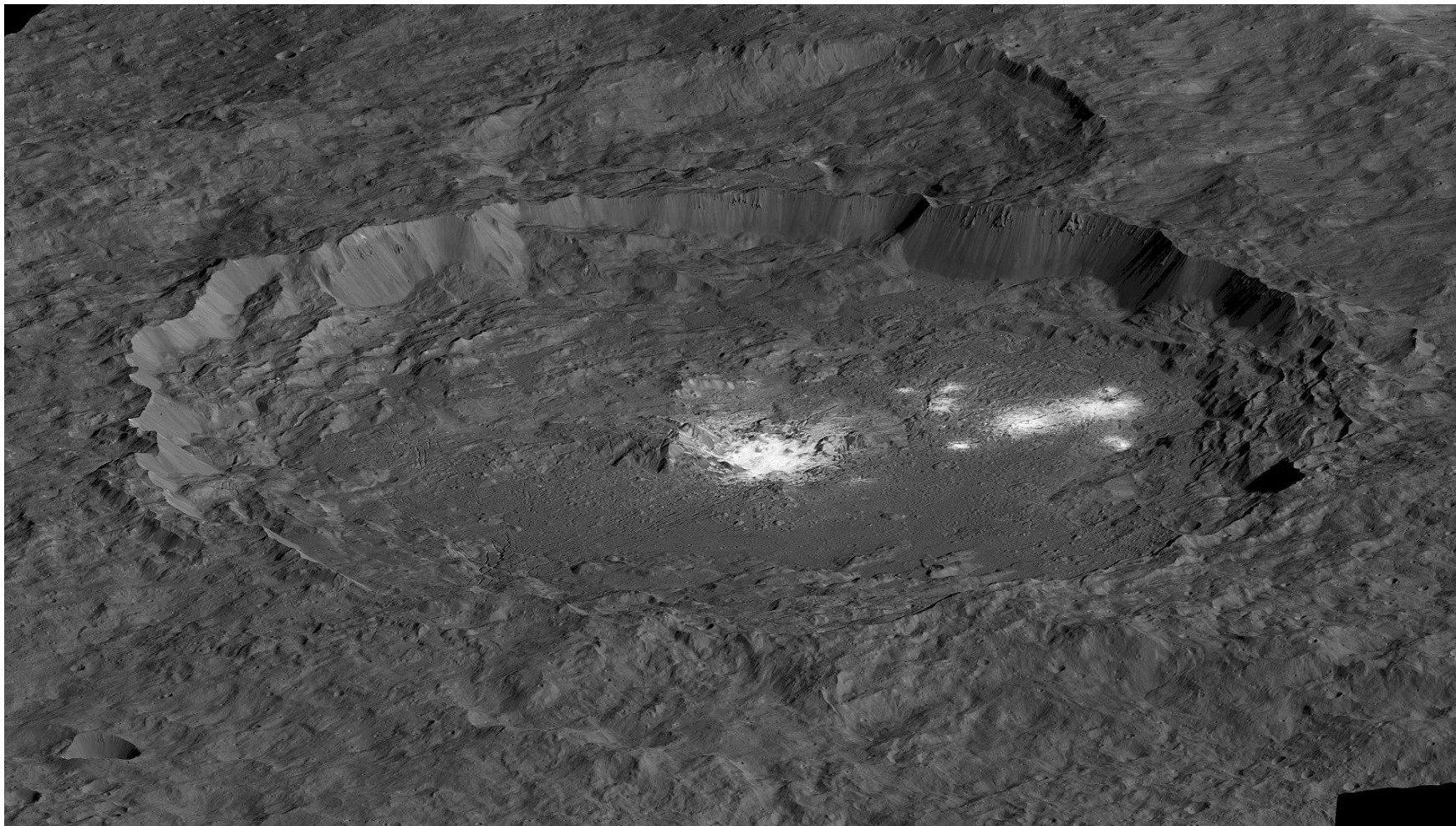






## L'astéroïde Cérès

Beaucoup de cratères ont une dépression centrale au lieu d'avoir un sommet central, comme sur la Lune



Le cratère d'Occator contient des régions brillantes (faculae), dues à des saumures riches en ammonium et sulfates de magnésium, provenant du sous-sol.





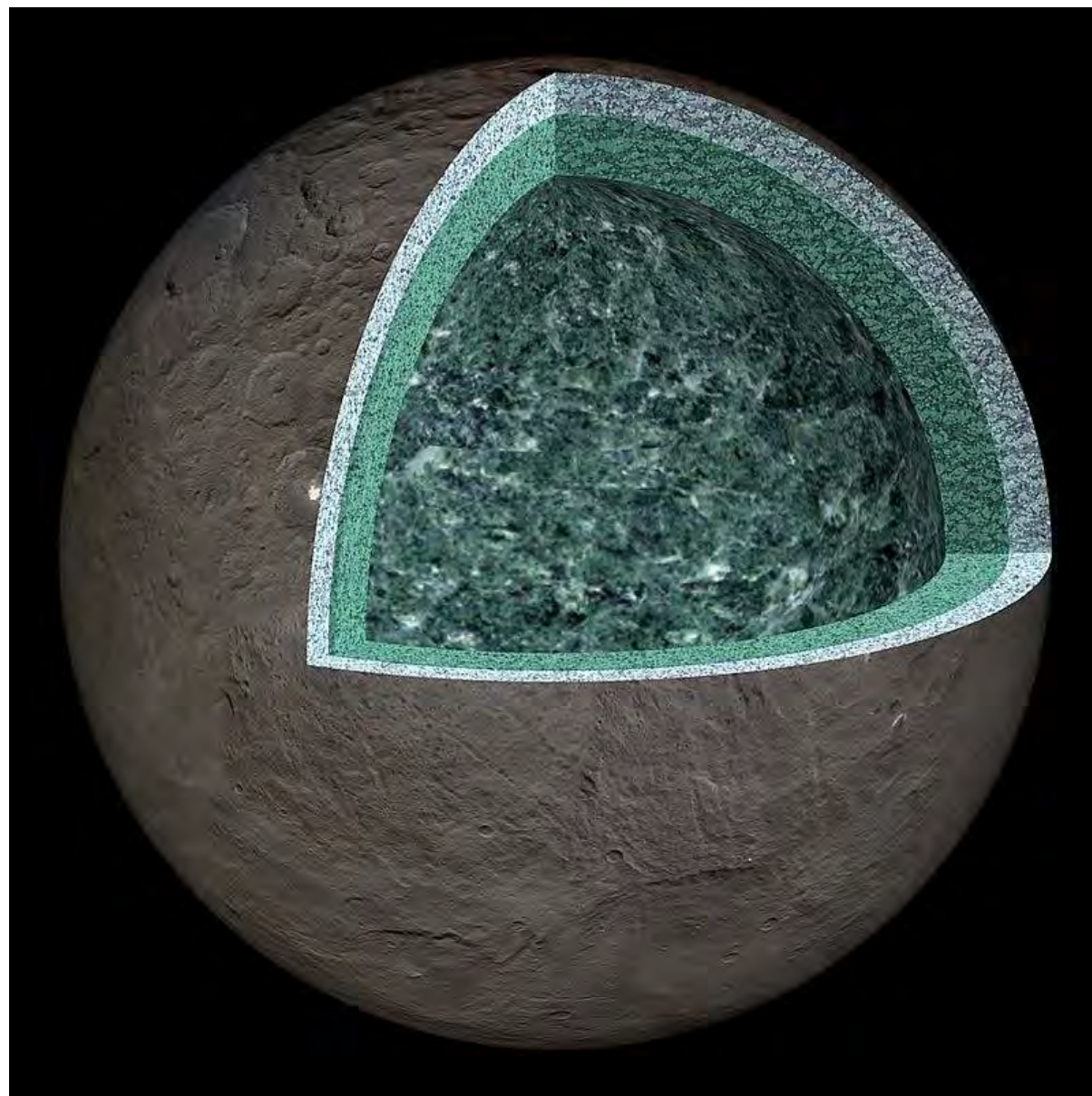
## L'astéroïde Cérès

Modèle à trois couches, élaboré à partir du champ de gravité mesuré par Dawn (Rogez Castillo et al., 2021):

une croûte externe de 40 km d'épaisseur composée de glace, de sels et de minéraux hydratés

une couche de 60 km d'un mélange boueux de saumure et de roches.

« manteau » interne boueux composé de roches hydratées, telles que des argiles





## L'astéroïde Vesta

Quatrième astéroïde découvert (1807)

Deuxième plus gros de la ceinture:

572.6 km × 557.2 km × 446.4 km

Type spectroscopique V

Visité par la sonde Dawn (NASA) pendant en 2011-2012

Composition de surface: Basalte

Albédo: 0,38

Densité: 3,42 g/cm<sup>3</sup>







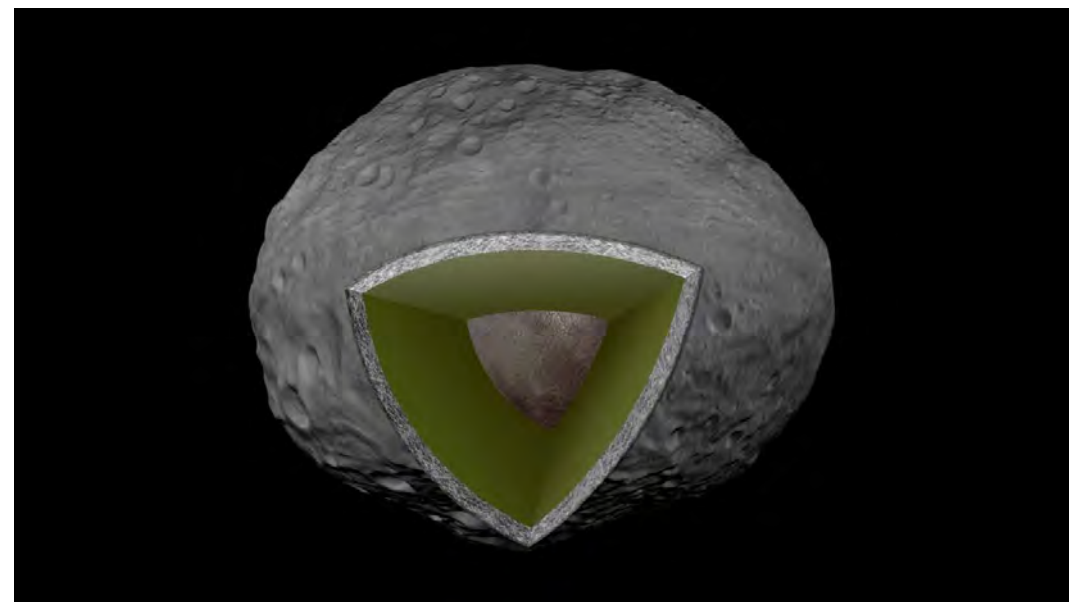
## L'astéroïde Vesta

La croûte basaltique suggère que l'astéroïde était complètement fondu dans le passé, ce qui a permis sa différenciation en un noyau de fer, de 100km de rayon, et un manteau d'olivine, entouré par la croûte basaltique (Russel et al., 2012)

Vesta est donc une mini-planète tellurique

**Seul astéroïde à avoir une telle structure.**

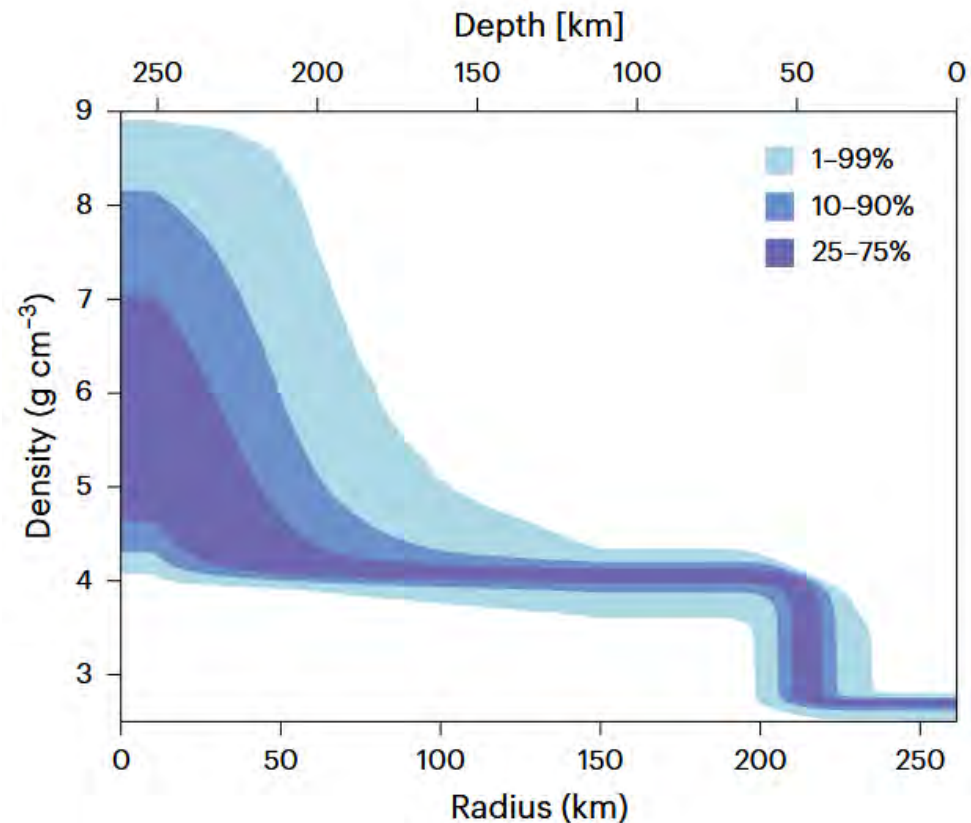
D'autres astéroïdes existent issus de la fragmentation de corps différenciés, mais Vesta est le seul corps différencié intact.





## Nouveau: un noyau pas très net

Une réanalyse du champ de gravité par Parker et al. (2025) révèle qu'il n'y a pas une transition de densité nette entre le manteau et le noyau, ce qui suggère que la différenciation métal-silicate a été seulement partielle, à différence des planètes



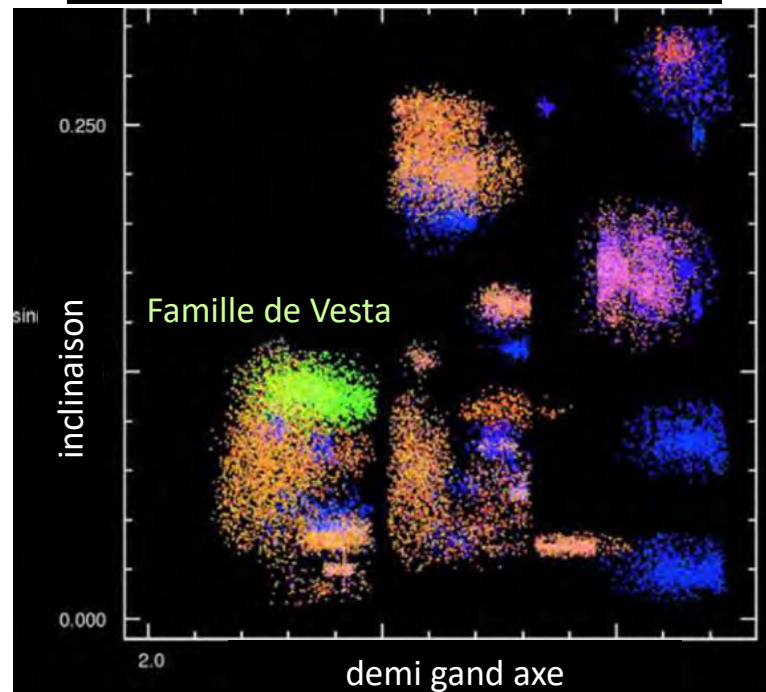
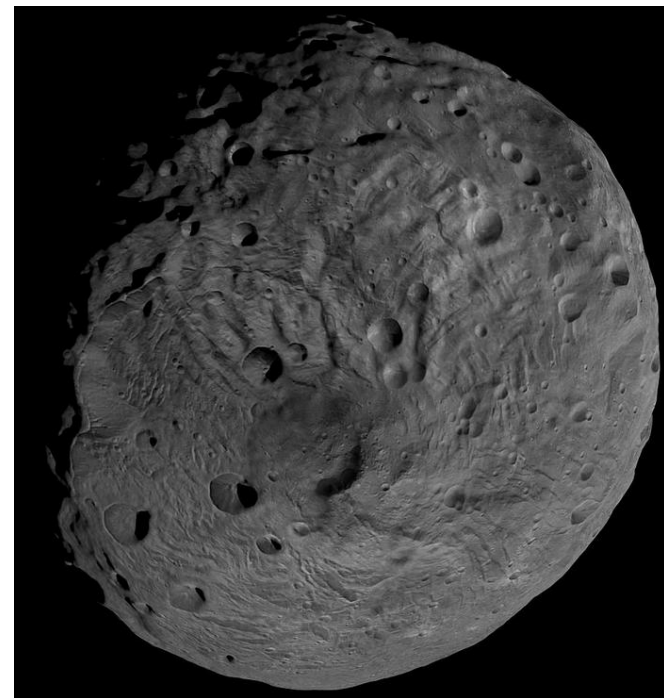
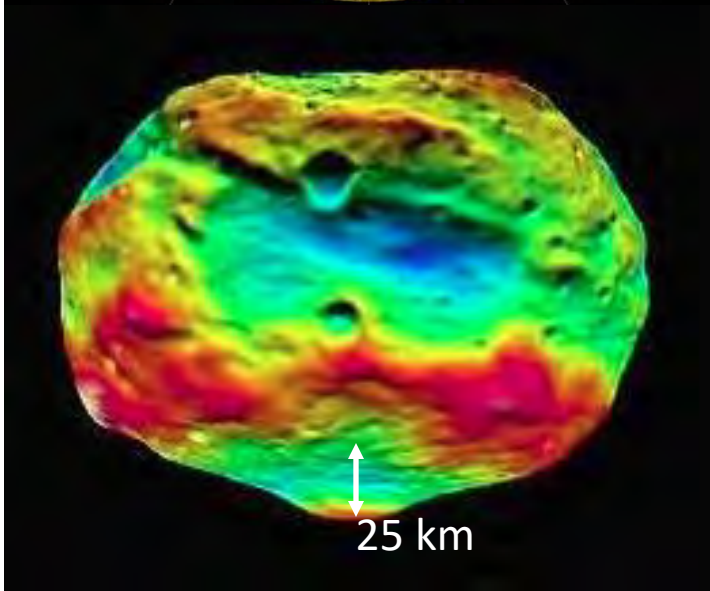
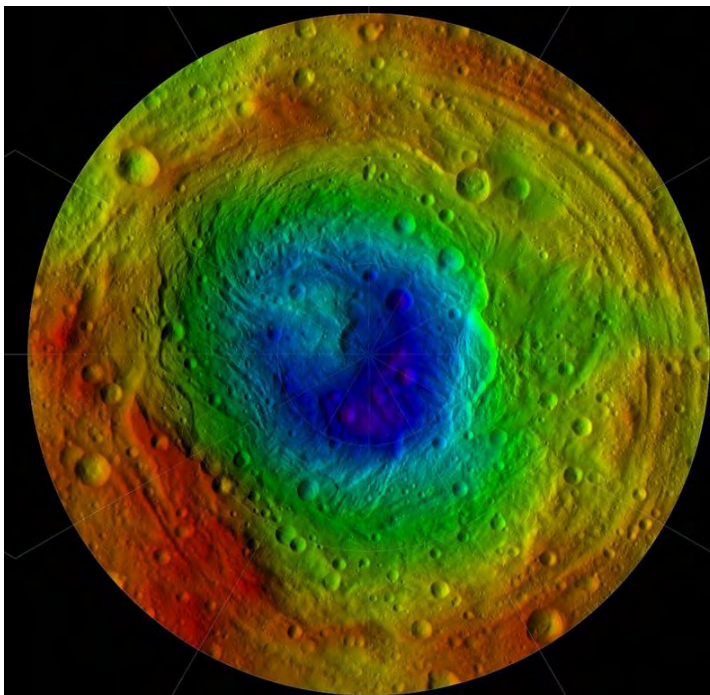


## L'astéroïde Vesta

Vesta est caractérisé par deux grands bassins d'impact au pôle sud, presque superposés : Veneneia, D=400 km, plus ancien, et Rheasilvia, D= 500 km.

Le bassin de Rheasilvia est le responsable de l'éjection de fragments de croûte qui constituent la famille de Vesta.

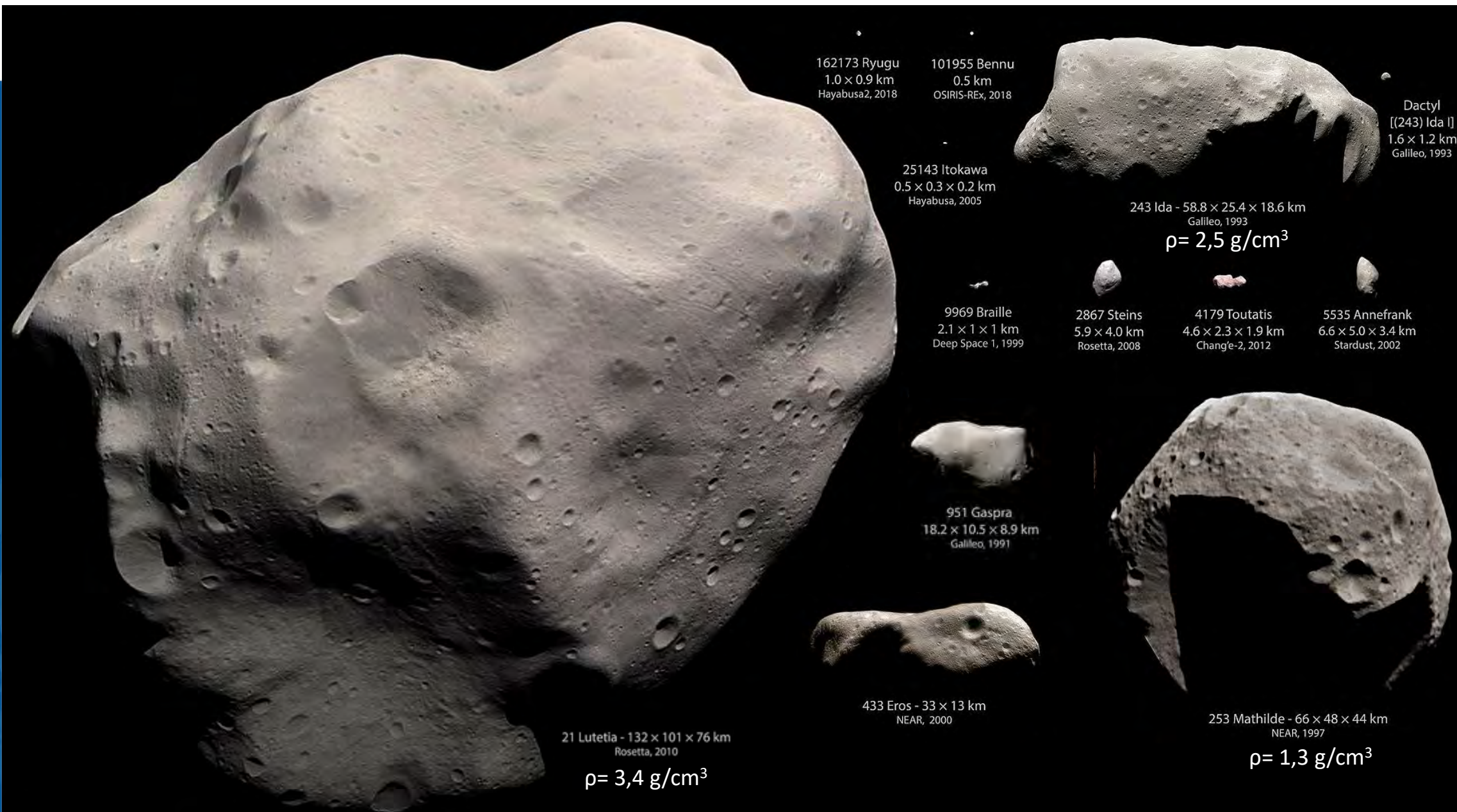
La bassin Rheasilvia a une profondeur de 20km et a excavé du matériel depuis ~60km de profondeur, sans pour autant exposer/éjecter le manteau d'olivine. La croûte basaltique est donc extraordinairement épaisse.







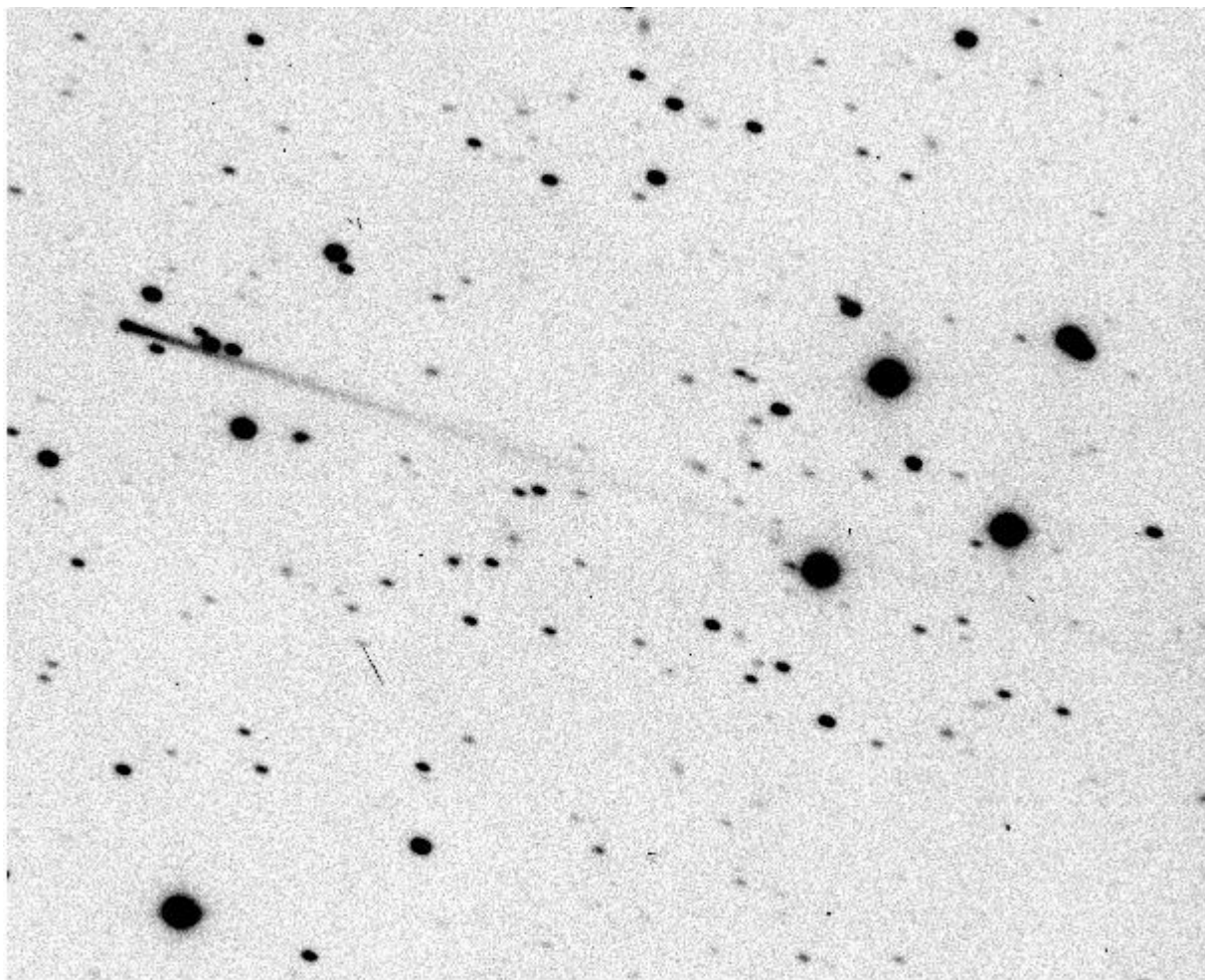
## Autres astéroïdes visités par des sondes spatiales







## Les comètes de la ceinture principale d'astéroïdes



Astéroïde **7968 Elst–Pizarro**

Éjection de poussières à chaque passage au périhélie

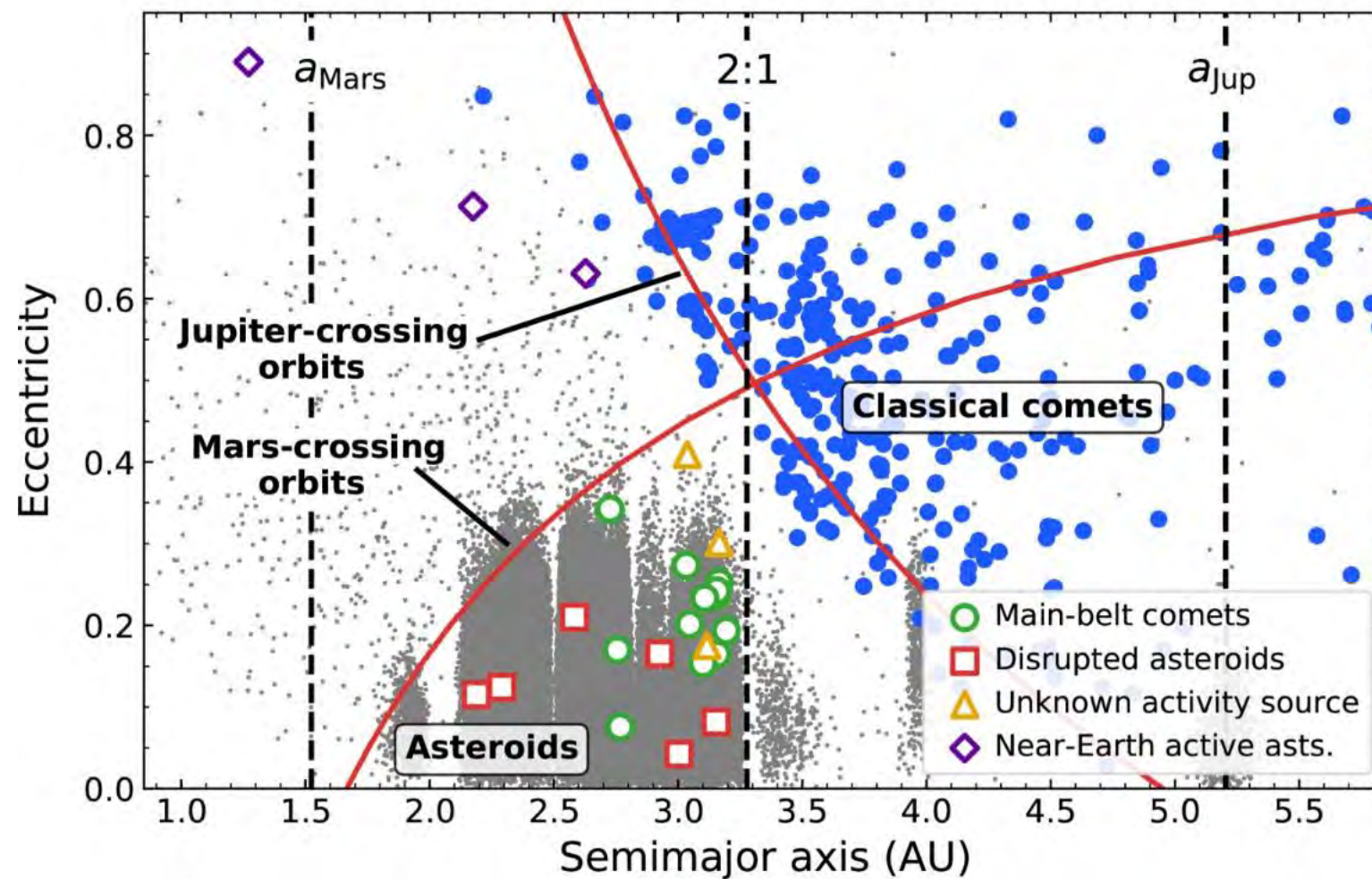
Dégazage détecté, provenant d'une région de 600m de diamètre

Cet astéroïde contient donc de la glace d'eau sous la surface, qui a été probablement récemment exposée par la formation d'un cratère.

Plusieurs autres astéroïdes sont similaires



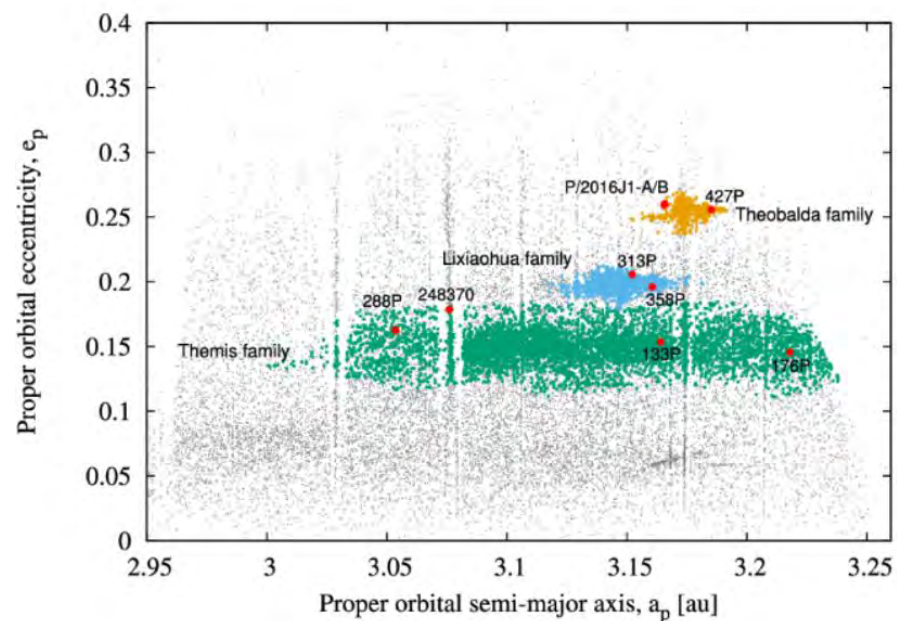
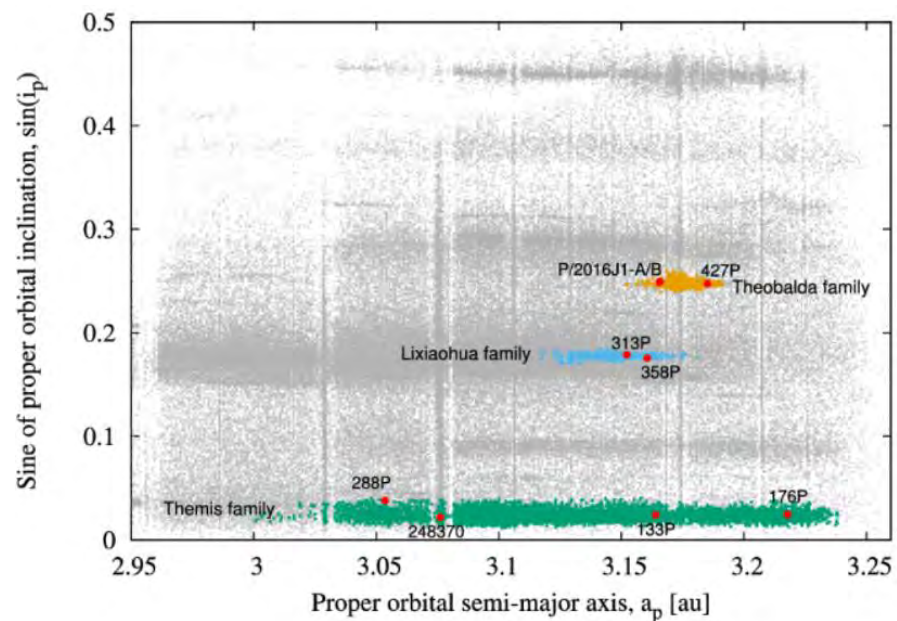
## Distribution orbitale des comètes de la ceinture principale



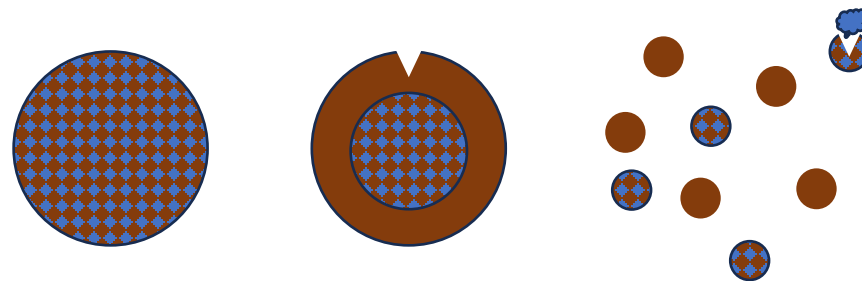




## Distribution orbitale des comètes de la ceinture principale



Beaucoup de comètes de la ceinture principale semblent être associées à des familles collisionnelles d'astéroïdes.



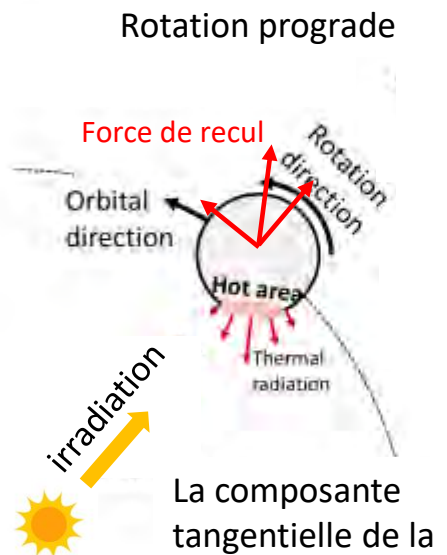
Novakovic et al., 2022



## Mobilité radiale des astéroïdes : L'effet Yarkovsky

Effet imaginé par Ivan O. Yarkovsky (1900) un ingénieur russe

Redécouvert et appliqué aux mouvements des astéroïdes par D. Rubincam (1995) et P. Farinella (1998)



La composante tangentielle de la force de recul est dans la direction du mouvement: accélération orbitale. Orbite en expansion

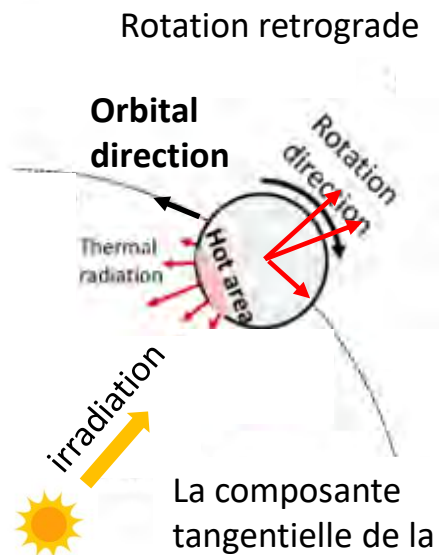
Force de recul  $F = \Phi / c$   
 $\Phi$ : puissance du flux thermique  
 $c$ : vitesse de la lumière



## Mobilité radiale des astéroïdes : L'effet Yarkovsky

Effet imaginé par Ivan O. Yarkovsky (1900) un ingénieur russe

Redécouvert et appliqué aux mouvements des astéroïdes par D. Rubincam (1995) et P. Farinella (1998)



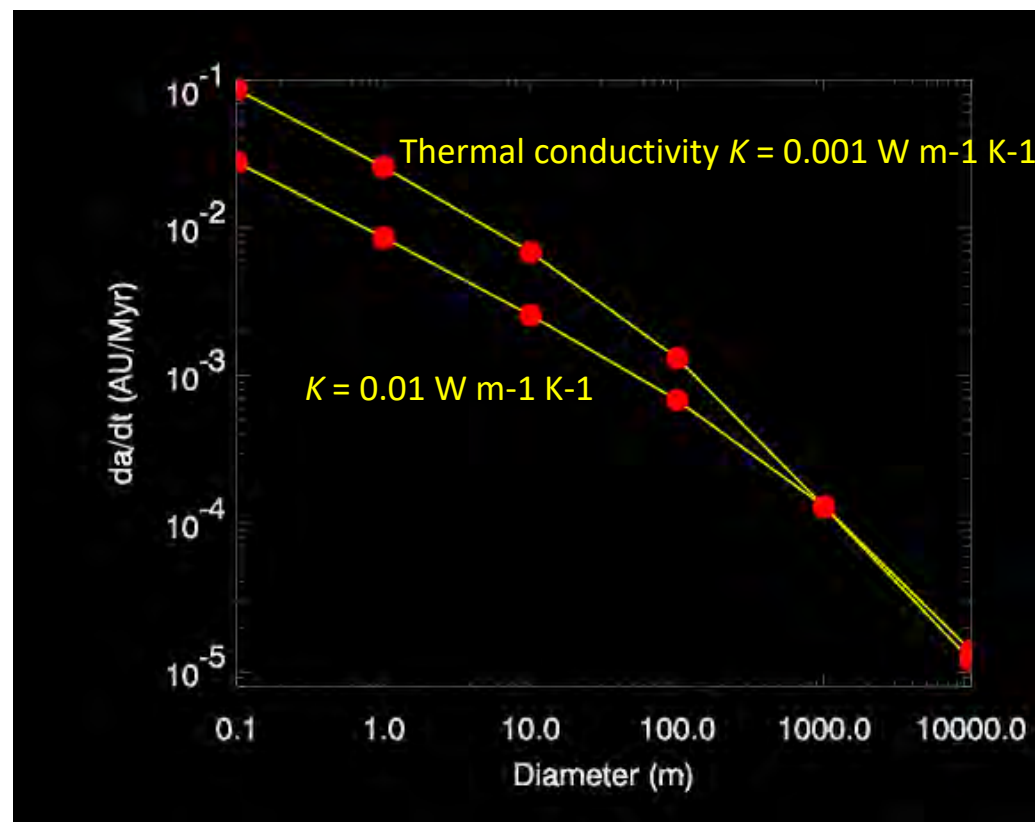
Force de recul  $F = \Phi / c$   
 $\Phi$ : puissance du flux thermique  
 $c$ : vitesse de la lumière

La composante tangentielle de la force de recul est dans la direction opposée au mouvement: décélération orbitale. Orbite en contraction





## Ampleur de l'effet Yarkovsky



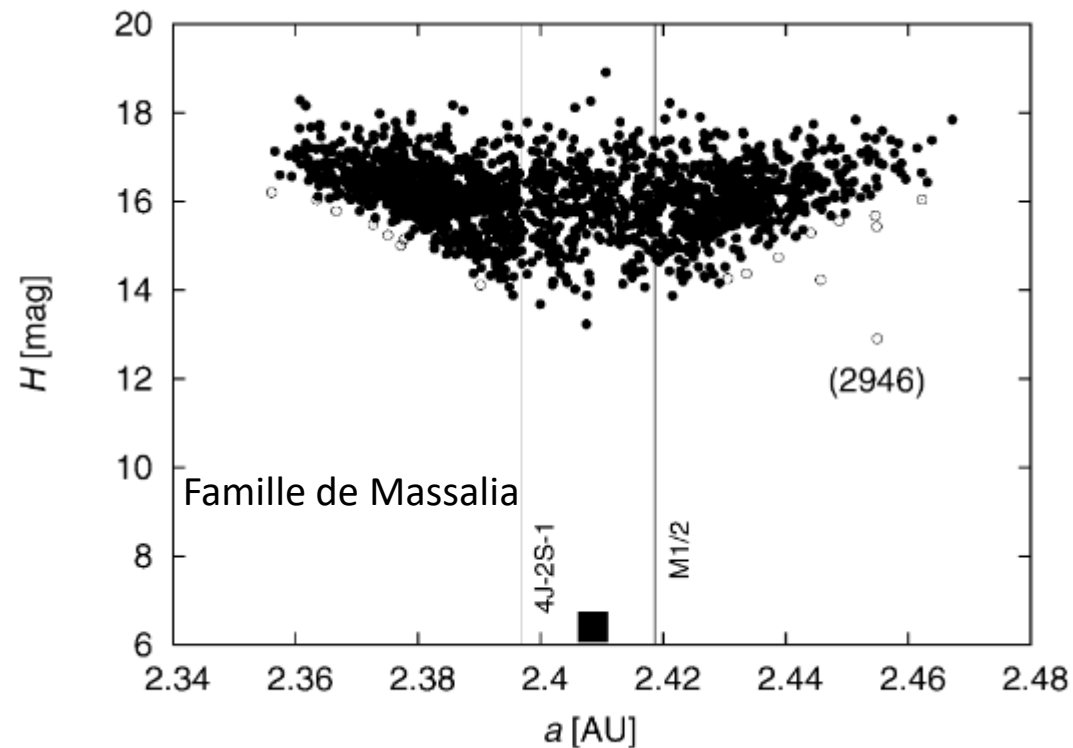
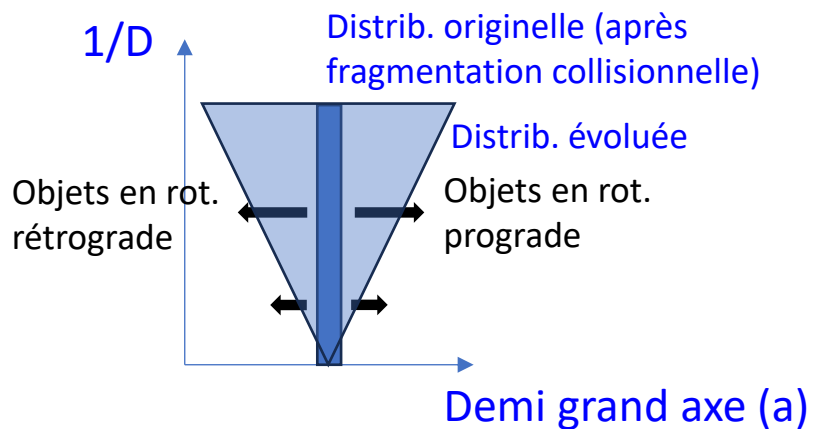
L'ampleur de l'effet Yarkovsky est dépendant:

- de la taille des objets (en  $1/D$  ou  $1/\sqrt{D}$ )
- de leur conductivité thermique
- de leur période de rotation et obliquité



## Effet réel ou imaginaire?

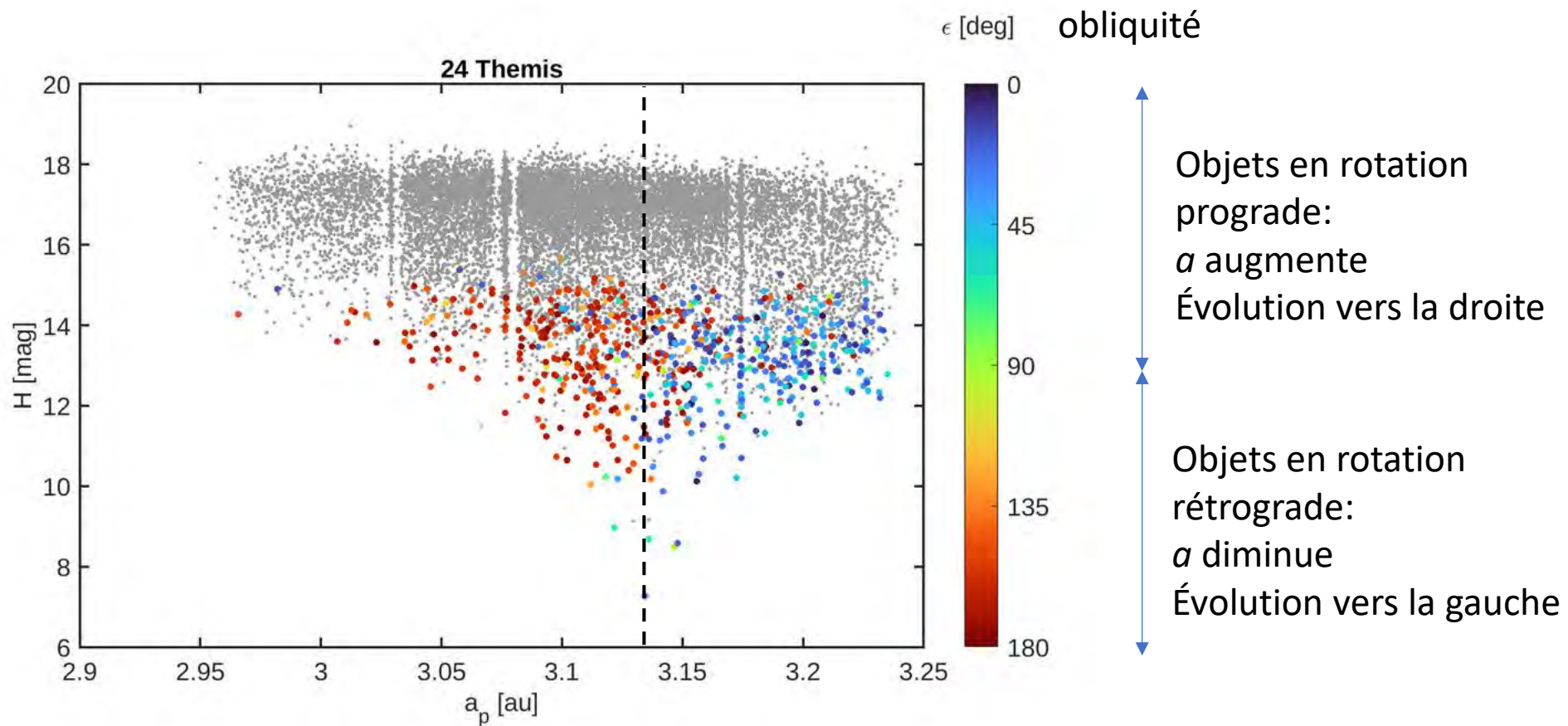
Une première preuve: la distribution radiale des familles en fonction de la taille des corps



Mais on peut toujours imaginer que la vitesse d'éjection des fragments, qui donne la dispersion initiale de la famille, soit proportionnelle à  $1/D$ .....



## Preuve que la dispersion des familles est due à l'effet Yarkovsky

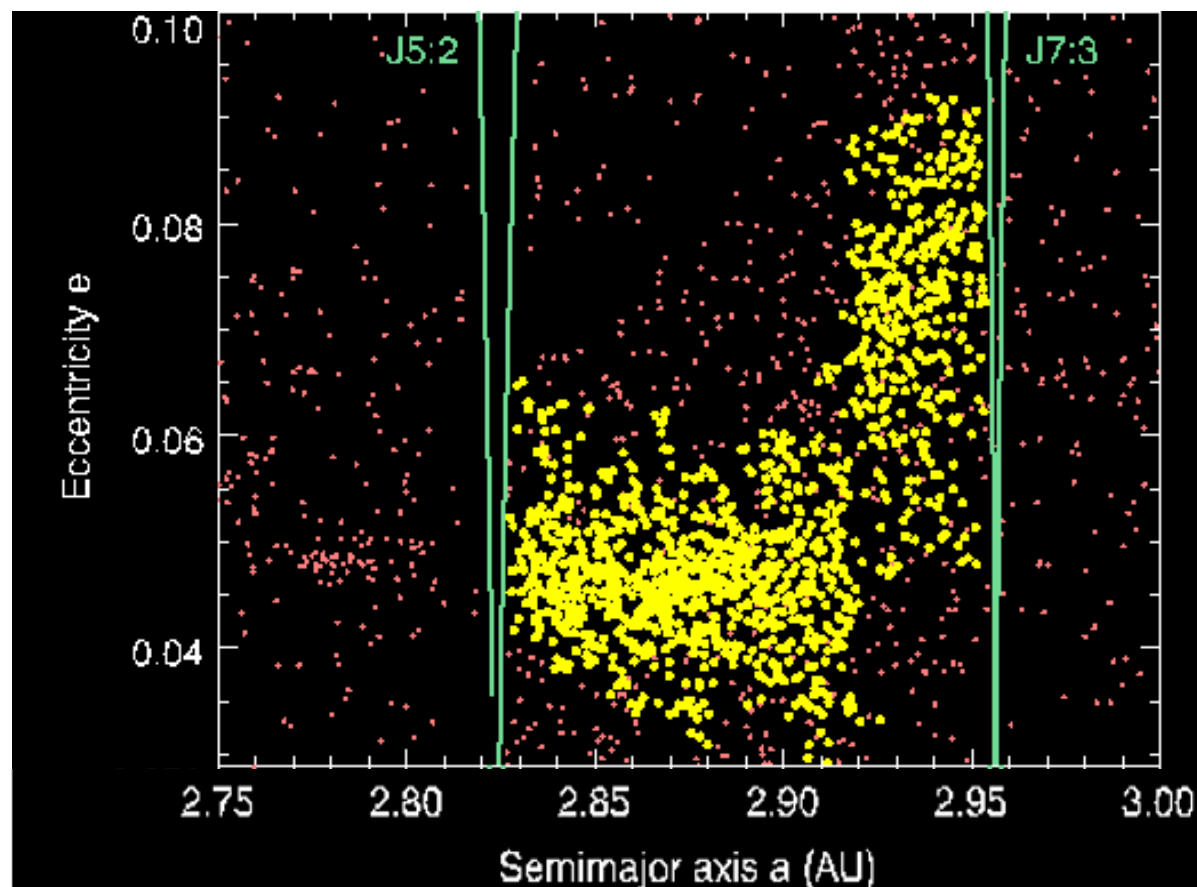






## Effet réel ou imaginaire?

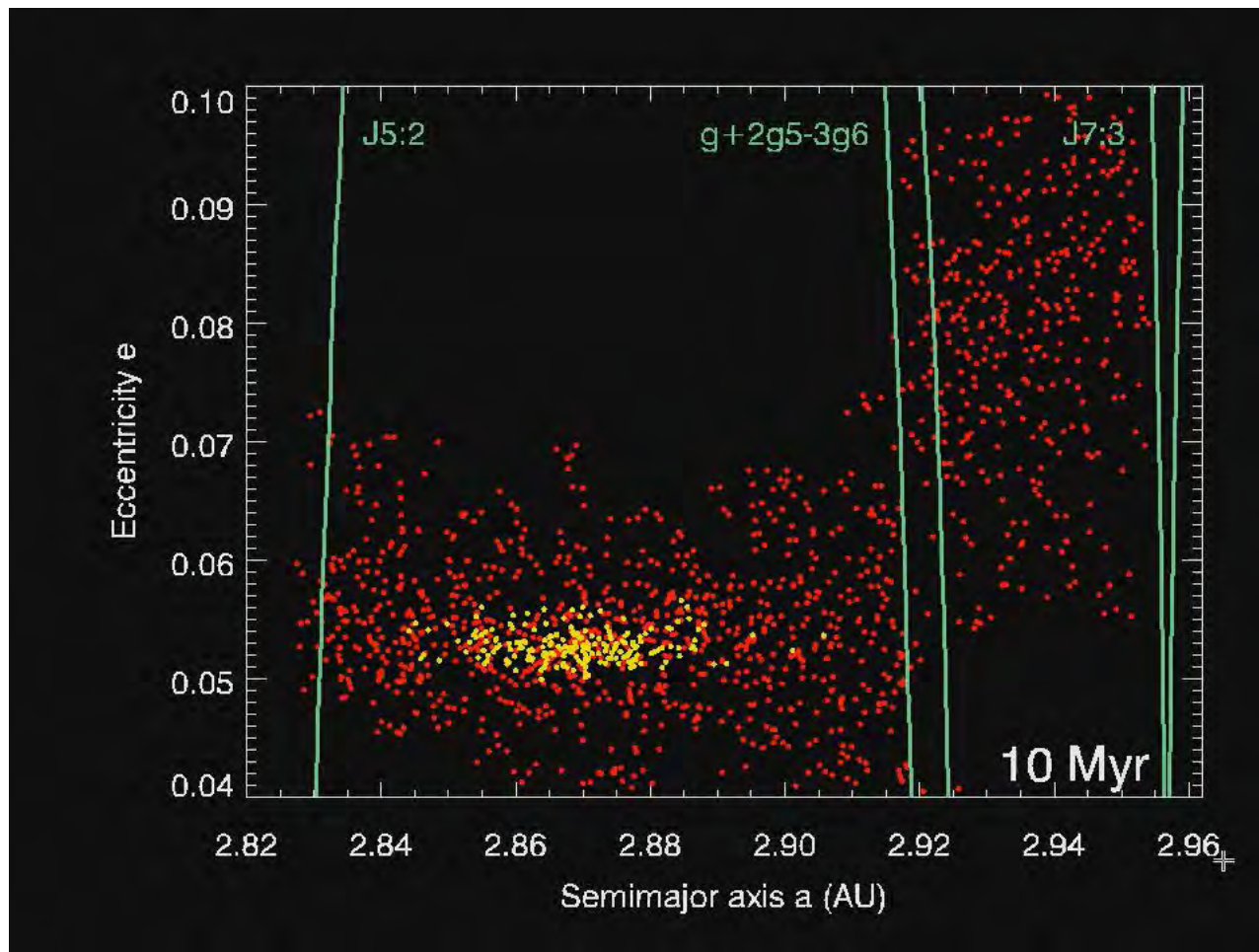
Une preuve définitive: l'étrange distribution orbitale de la famille de Koronis





## Effet réel ou imaginaire?

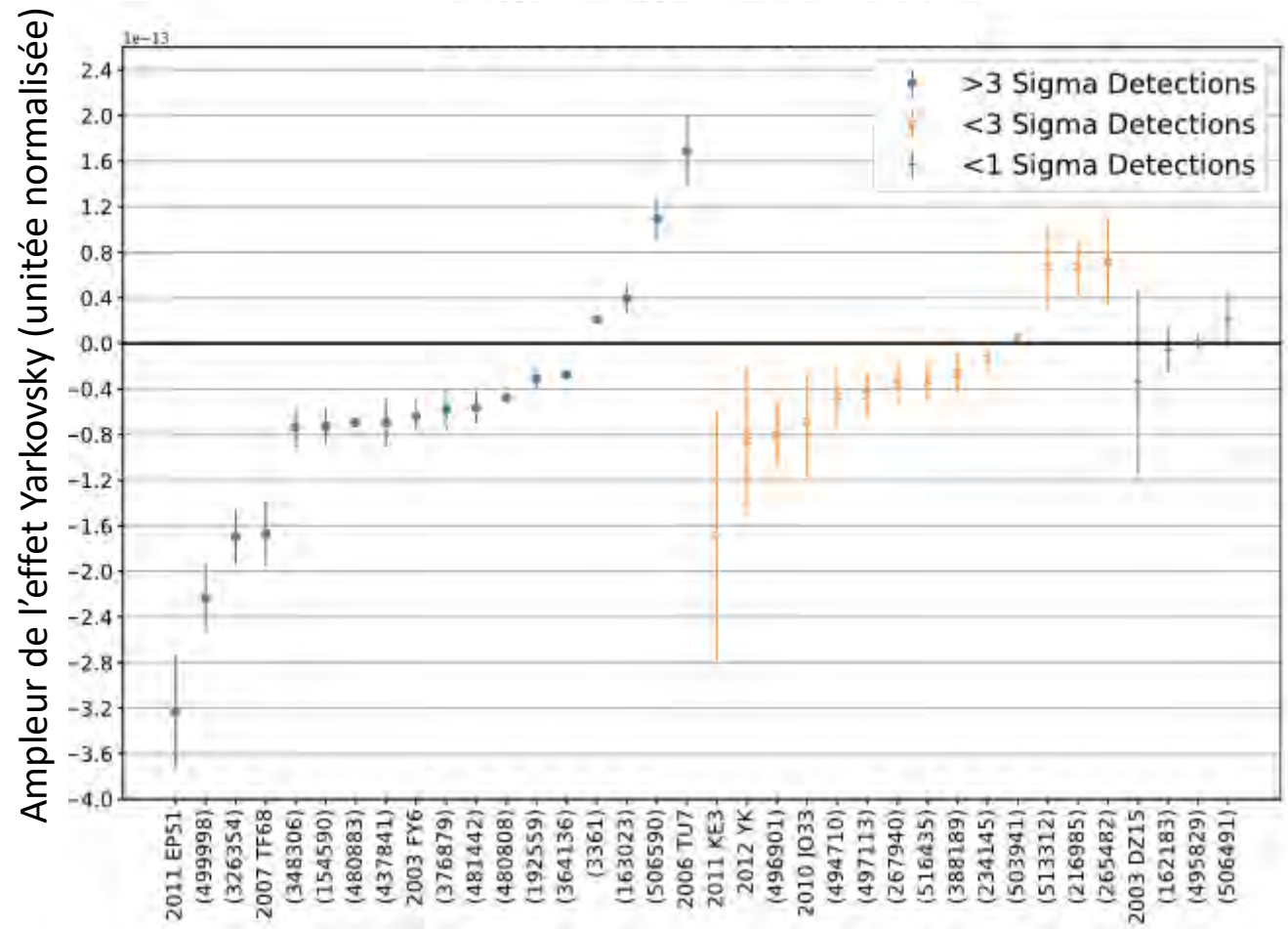
Une preuve définitive: l'étrange distribution orbitale de la famille de Koronis



Bottke et al., (2001)  
*Science* 294, 1693-1696



# Mesures directes de l'effet Yarkovsky

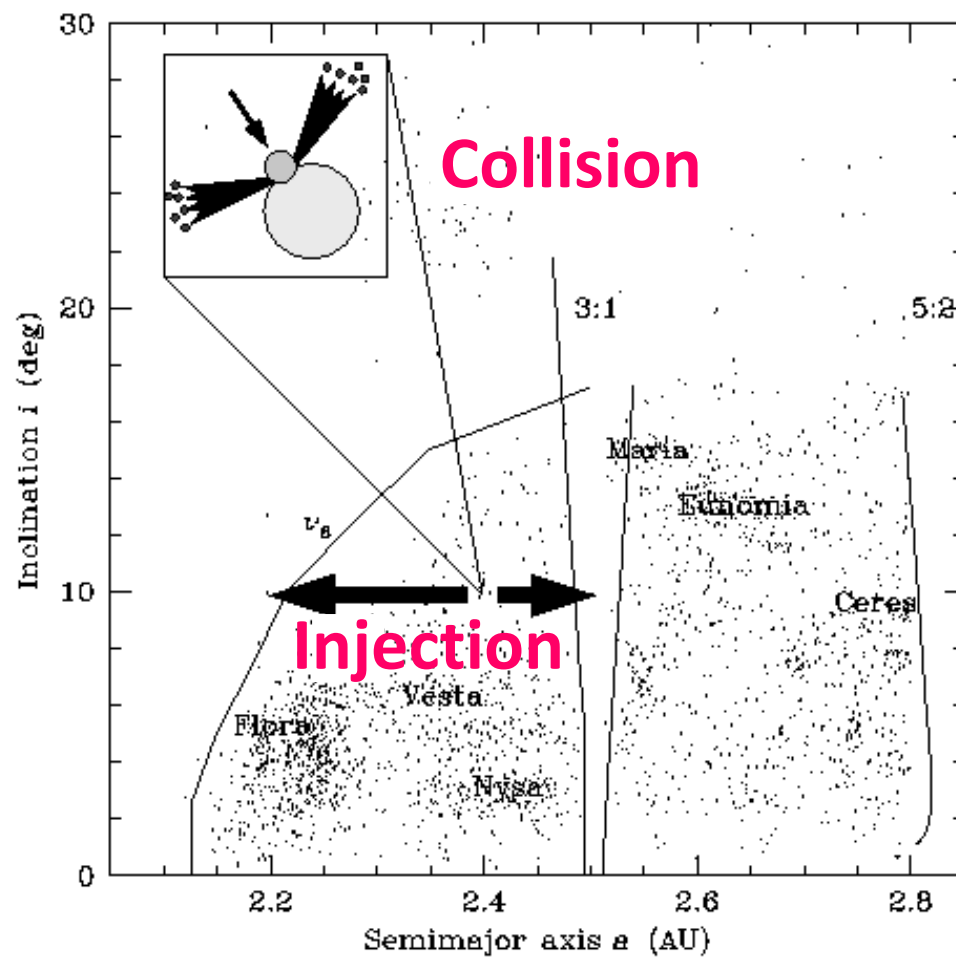


Greenstreet et al., 2019



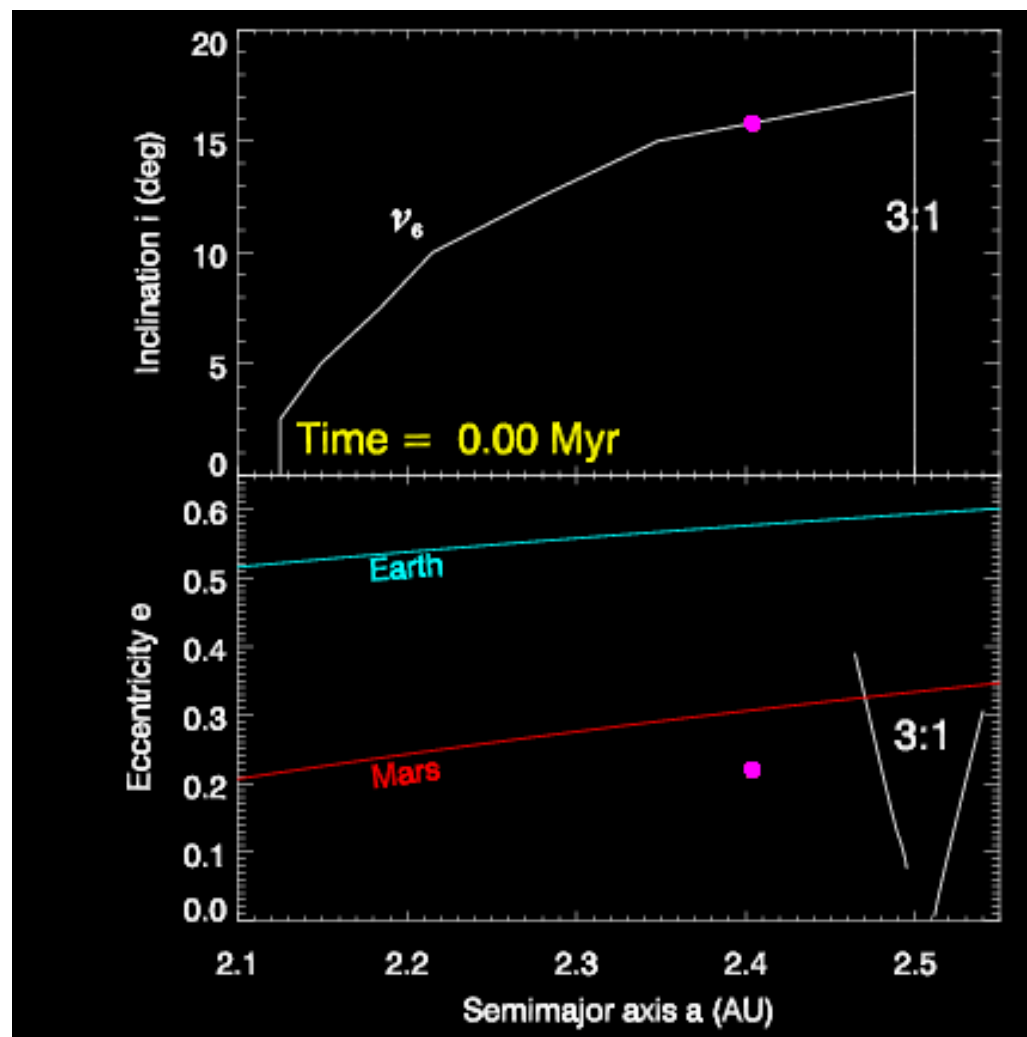


# Effet Yarkovsky et l'origine d'astéroïdes géocroiseurs/météorites





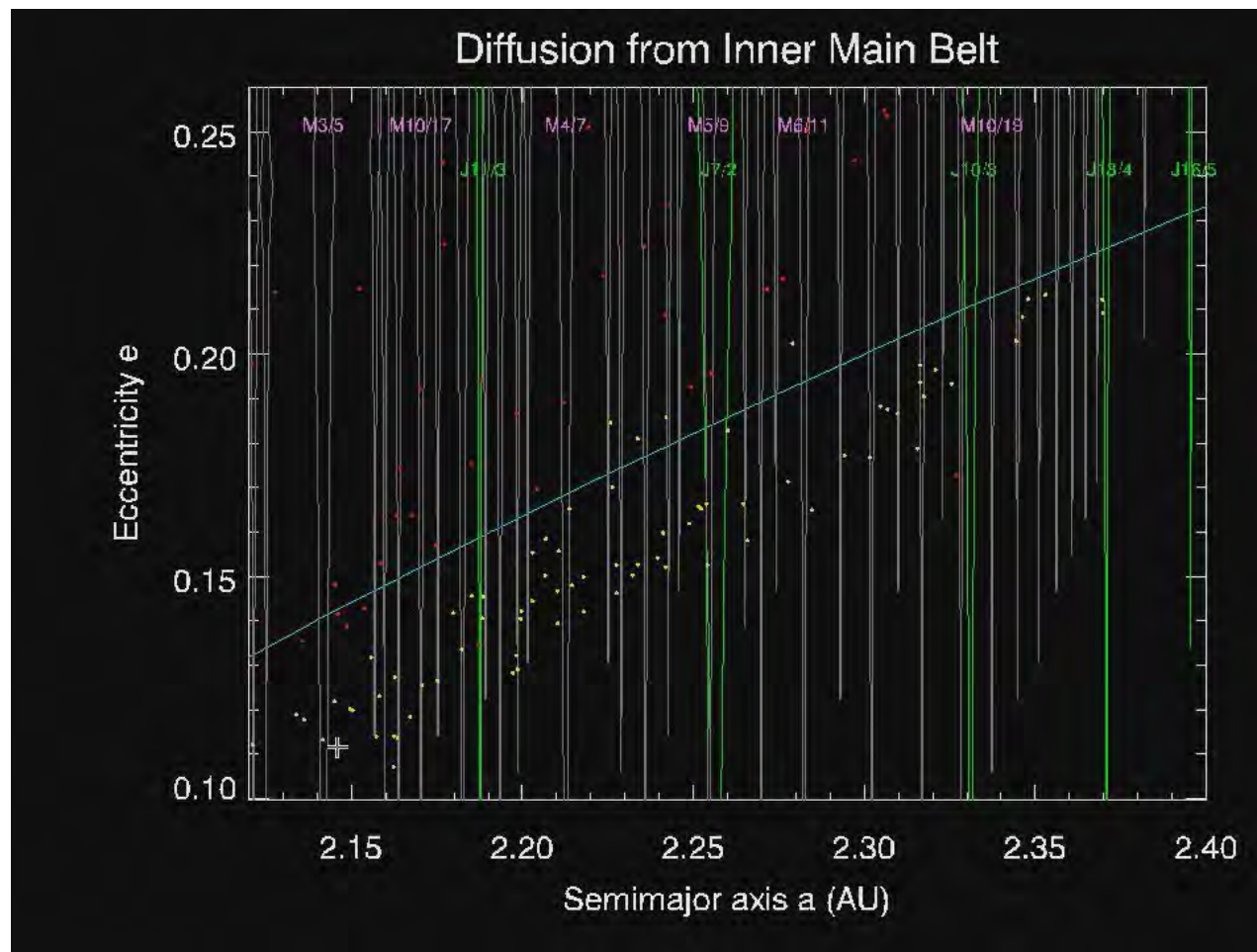
# Effet Yarkovsky et l'origine d'astéroïdes géocroiseurs/météorites





# Effet Yarkovsky et l'origine d'astéroïdes géocroiseurs/météorites

Tout en réseau de résonances “mineures” interagit avec l'effet Yarkovsky pour permettre la fuite d'astéroïdes



Évolution  
d'astéroïdes de  
1km de diamètre

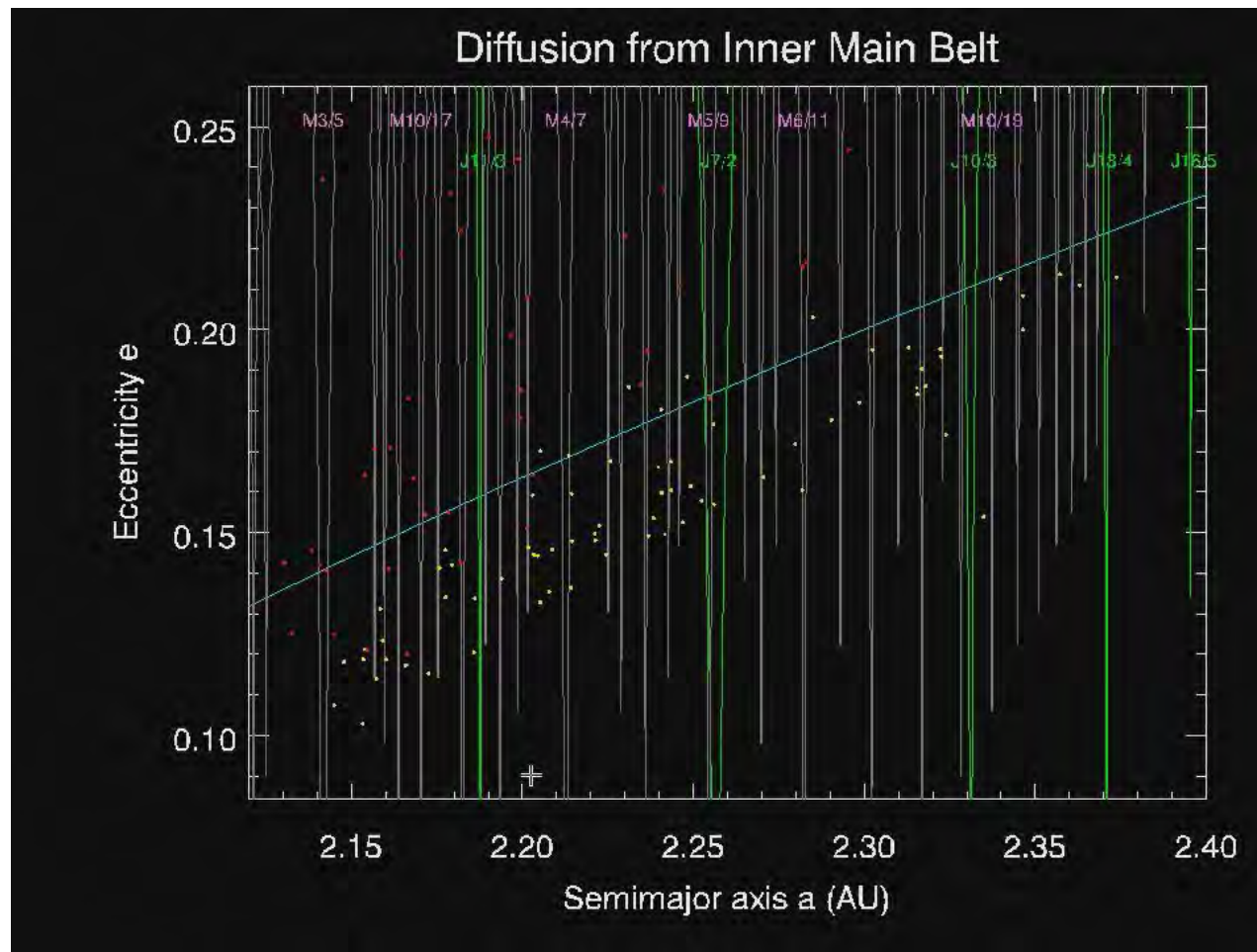
En jaune:  
évolution avant la  
première  
rencontre proche  
avec une planète  
tellurique.  
En rouge: après





# Effet Yarkovsky et l'origine d'astéroïdes géocroiseurs/météorites

Tout en réseau de résonances “mineures” interagit avec l'effet Yarkovsky pour permettre la fuite d'astéroïdes



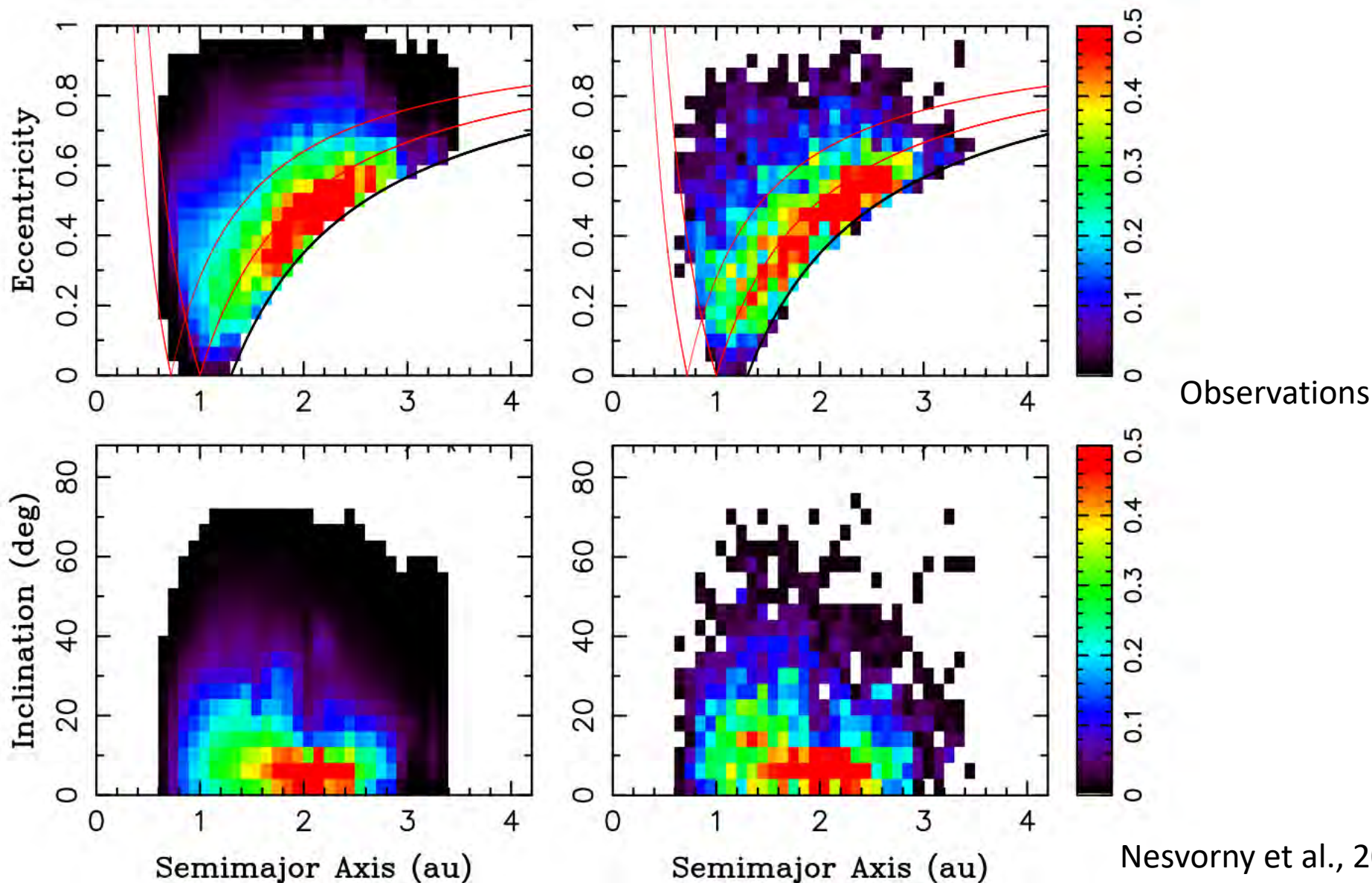
Évolution  
d'astéroïdes de  
100m de diamètre

En jaune:  
évolution avant la  
première  
rencontre proche  
avec une planète  
tellurique.  
En rouge: après



# Distribution orbitale des astéroïdes géocroiseurs maintenue en état stationnaire par la fuite d'astéroïdes de la ceinture principale via l'effet Yarkovsky

Modèle + biais observationnels



Nesvorny et al., 2023



## A retenir

- Les astéroïdes sont des corps rocheux, sans glace à leur surface, mais souvent avec des signatures d'altération aqueuse, parfois avec de la glace à l'intérieur, situés principalement entre Mars et Jupiter (ceinture principale)
- La ceinture principale est bornée aussi par des résonances séculaires et de moyen mouvement.
- L'astéroïde le plus grand est Cérès (presque 1.000 km). Il y a environ  $2 \times 10^6$  objets avec  $D > 1$  km
- Les objets plus petits que 10 km sont à l'équilibre collisionnel car leur vie collisionnelle est plus courte de l'âge du Système solaire.
- Les familles d'astéroïdes sont les traces évidentes de collisions catastrophiques qui ont eu lieu dans la ceinture principale.
- Il y a une multitude de classes spectroscopiques d'astéroïdes. Mais en gros on peut partager les astéroïdes en deux groupes: ceux sombres, riches en carbone (classes C, B, D, ...) et ceux plus réfléchissants, riches en olivine et pyroxène (S). Il y a aussi des astéroïdes couverts de basaltes (V), métalliques (X) etc.
- Les astéroïdes de classes spectrales différentes sont bien mélangés. Mais il y a néanmoins une tendance à avoir plus d'objets S dans la partie interne de la ceinture et plus d'objets C/D dans la partie externe.
- Cérès et Vesta sont des corps très différents: riche en minéraux hydratés le premier, différencié et couvert de basaltes le deuxième.
- L'effet Yarkovsky est dû à la réémission thermique des astéroïdes. Il permet la dérive lente des astéroïdes en demi-grand axe.
- Il a un effet sur la dispersion des familles collisionnelles et permet aux objets d'atteindre des résonances et devenir géocroiseurs.